

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE INDUSTRIEL**

**PAR  
TAMER EL-SHENAWY**

**OPTIMISATION ET CONCEPTION DE RÉSEAU DE  
LOGISTIQUE INVERSE**

**OCTOBRE 2005**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## **Remerciements**

Je tiens à remercier les personnes suivantes : M. Georges Abdul-Nour, directeur de recherche, pour son temps et son support technique et moral. De même que M. Jocelyn Drolet, co-directeur de recherche pour son temps et ses conseils. Je remercie également M. Dong Cao et M. Serge Lambert pour leurs conseils qui ont enrichi ce travail.

## **Optimisation et conception de réseau de logistique inverse**

Tamer ElShenawy

(Sommaire)

Pendant la dernière décennie, les systèmes de logistique inverse sont devenus de plus en plus importants pour les entreprises manufacturières oeuvrant dans plusieurs industries et différents contextes. Par conséquent, davantage d'attention a été accordée à la gestion de ces systèmes et il existe un besoin considérable pour des outils qui permettent d'améliorer cette gestion.

Cette recherche consiste à étudier plusieurs travaux traitant le problème de retour de produits aux producteurs pour des fins de recyclage, de réusinage et de disposition.

Dans un premier temps, cette étude abordera le terme de logistique inverse et son importance dans la vie des entreprises, notamment au cours de la dernière décennie. Ensuite, la problématique de logistique inverse sera présentée.

Dans un deuxième temps, les travaux de recherche comportant des modèles de logistique inverse traitant les problèmes de retour en industrie seront étudiés. Ceci se réalisera en se concentrant sur le côté de logistique inverse lié au transport.

Ensuite, des classifications de ces modèles et de leurs applications respectives sont effectuées. Les modèles seront classifiés selon différents critères : l'objectif des modèles, le contexte industriel, la technique de solution, etc.

En terminant, le cas d'étude d'une entreprise qui dispose d'un réseau de logistique inverse sera présenté et un modèle sera sélectionné pour l'adapter à ce cas.

Afin de concevoir l'infrastructure du réseau de logistique inverse, un modèle de programmation linéaire sera développé pour résoudre ce problème de retour. Le but du modèle sera d'optimiser ce système de logistique inverse en minimisant les coûts totaux. Et ce, en utilisant les méthodes de recherche opérationnelle, ce qui permet de planifier le réseau de logistique inverse en déterminant les quantités et les localisations optimales.

Plusieurs scénarios comportant des changements dans la structure du réseau de retour sont étudiés. Ceci permet de comparer le cas réel aux scénarios suggérés et de déterminer lequel des scénarios est le plus économique par rapport à l'entreprise. Pour le scénario initial, les quantités initiales acheminées à travers le réseau ont été calculées. Les installations optimales ont aussi été déterminées. Pour tous les scénarios, l'influence du facteur de transport sur les coûts totaux du réseau a aussi été étudiée.

## Table de Matières

<b>Remerciements .....</b>	<b>I</b>
<b>(Sommaire) .....</b>	<b>II</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>VII</b>
<b>Chapitre 1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 Définitions.....	1
1.2 Importance de la logistique inverse .....	2
1.3 Problématique .....	5
1.4 Objectifs.....	6
1.5 La méthodologie .....	7
1.6 Résultats visés .....	7
<b>Chapitre 2 Modèles de programmation linéaire en logistique inverse.....</b>	<b>8</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>8</b>
<b>Dans ce chapitre, les activités de logistique inverse seront abordées et plusieurs modèles d'optimisation de réseaux de retour seront présentés</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Activités principales de logistique inverse .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Modèles de programmation linéaire en logistique inverse.....</b>	<b>10</b>
I) Industrie des appareils électriques .....	11
II) Conteneurs de retour.....	15
III) Photocopieurs.....	18
IV) Matières dangereuses .....	26
V) Industrie de la fabrication des automobiles .....	35
VI) Matériaux de construction.....	38
VII) Déchets solides.....	48
VIII) Recyclage des tapis.....	52
<b>Chapitre 3 Classifications .....</b>	<b>57</b>
3.1 Classification par type de contraintes .....	57
3.2 Classification par type d'industrie (ou produit) .....	59
3.3 Classification par outil de solution .....	61
3.4 Classification par technique de résolution .....	62
3.5 Classification MILP vs Continu .....	63
3.6 Classification par objectif du modèle .....	63
3.7 Classification par composante de la fonction objective versus les résultats du modèle .....	65
3.8 Classification selon les besoins (raisons) de retour.....	68
3.8.1 La remise en état.....	68
3.8.2 La réutilisation.....	68
3.8.3 Recyclage .....	68
3.8.4 Rappel des produits.....	69
3.9 Classification selon les activités .....	70
3.10 Classification selon le degré de liberté de choix des localisations.....	72
<b>Chapitre 4 Sélection et choix de modèle .....</b>	<b>73</b>
<b>Chapitre 5 Le problème d'optimisation du réseau de retour des M D R .....</b>	<b>79</b>
5.1 Introduction.....	79
5.2 Les données .....	82
5.3 La fonction objective .....	83
5.4 La Modélisation .....	84
5.5 L'outil de résolution.....	85

5.6	Les résultats .....	85
5.7	Commentaires sur les résultats .....	87
5.8	Commentaires généraux .....	88
5.9	Conclusions et recommandations.....	89
5.10	Positionnement du modèle par rapport aux modèles classifiés: .....	90
<b>Chapitre 6</b>	<b>Scénarios .....</b>	<b>91</b>
6.1	Introduction.....	91
6.2	Description du scénario 2 .....	91
6.3	Description du scénario 3.....	94
6.4	Description du scénario 4 .....	97
6.5	Description du scénario 5 .....	97
6.6	Description du scénario 6 .....	98
6.7	Analyse de sensibilité .....	100
6.7.1	Augmentation des coûts de transport .....	100
6.7.2	Augmentation des coûts fixes .....	101
6.8	Analyses et comparaison.....	103
<b>Conclusion et futures recherches .....</b>		<b>106</b>
<b>Bibliographie .....</b>		<b>109</b>
<b>Annexe A Matrices de distances de transport entre les sites de transit et les Centres de traitement .....</b>		<b>113</b>
<b>Annexe B Résultats de l'analyse par ANOVA sur les données mensuelles .....</b>		<b>121</b>
<b>Annexe C Modèle Lingo Scénario 1 .....</b>		<b>123</b>
<b>Annexe D Modèle Lingo Scénario 2 .....</b>		<b>129</b>
<b>Annexe E Modèle Lingo scénario 3.....</b>		<b>131</b>
<b>Annexe F Modèle Lingo Scénario 4.....</b>		<b>133</b>
<b>Annexe G Modèle Lingo Scénario 6 .....</b>		<b>138</b>

### Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b>	<b>Classification des modèles par type de contraintes .....</b>	<b>58</b>
<b>Tableau 2:</b>	<b>Classification par type d'industrie (ou produit) .....</b>	<b>60</b>
<b>Tableau 3:</b>	<b>Classification par outil de solution .....</b>	<b>61</b>
<b>Tableau 4:</b>	<b>Classification par technique de solution.....</b>	<b>62</b>
<b>Tableau 5:</b>	<b>Classification MILP vs Continu .....</b>	<b>63</b>
<b>Tableau 6:</b>	<b>Classification par objectif du modèle .....</b>	<b>64</b>
<b>Tableau 7:</b>	<b>Classification par composante de la fonction objective versus les résultats du modèle.....</b>	<b>66</b>
<b>Tableau 8:</b>	<b>Classification des modèles selon les besoins de retour .....</b>	<b>69</b>
<b>Tableau 9:</b>	<b>Les activités de logistique inverse (Rogers et Tibben-lembeke 1998) .....</b>	<b>70</b>
<b>Tableau 10:</b>	<b>Classification des modèles selon les activités de retour.....</b>	<b>71</b>
<b>Tableau 11:</b>	<b>Classification des modèles selon le degré de liberté de choix des localisations.....</b>	<b>72</b>
<b>Tableau 12:</b>	<b>Comparaison entre le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000) et celui de MDR .....</b>	<b>78</b>
<b>Tableau 13:</b>	<b>Quantités optimales acheminées vers les CT sélectionnés ...</b>	<b>86</b>
<b>Tableau 14:</b>	<b>Répartition des charges optimales sur les CT .....</b>	<b>92</b>
<b>Tableau 15:</b>	<b>Répartition des charges optimales pour le scénario 3.....</b>	<b>95</b>
<b>Tableau 16:</b>	<b>Coûts de transport séparés des coûts fixes par scénario .....</b>	<b>99</b>
<b>Tableau 17:</b>	<b>Augmentation des coûts totaux avec augmentation des coûts de transport.....</b>	<b>100</b>
<b>Tableau 18:</b>	<b>L'augmentation des coûts totaux avec les coûts fixes .....</b>	<b>101</b>
<b>Tableau 19:</b>	<b>Comparaison entre les effets de l'augmentation des coûts de transport et les coûts fixes sur les coûts totaux pour les scénarios 1et 2.....</b>	<b>104</b>



## Liste des figures

<b>Figure 1:</b>	<b>L'influence de la logistique sur l'environnement (Haw-Jan et Steven 1995).....</b>	<b>4</b>
<b>Figure 2:</b>	<b>Système de logistique inverse générique .....</b>	<b>5</b>
<b>Figure 3:</b>	<b>Processus de recyclage des tapis (Louwers et al. 1999).....</b>	<b>6</b>
<b>Figure 4:</b>	<b>Modélisation (adaptée) d'un processus générique de réusinage (Kerr et Ryan 2000) .....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 5:</b>	<b>Réseau de retour des conteneurs (Leo Kroon &amp; Gaby Vrijens, 1995).....</b>	<b>16</b>
<b>Figure 6:</b>	<b>Réseau de retour des photocopieurs chez Océ (Krikke et al. 1999).....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 7:</b>	<b>Modèle de retour des matières dangereuses. (Tung-Lai Hu et al 2002).....</b>	<b>32</b>
<b>Figure 8:</b>	<b>Processus de retour du sable. ( Barros et al. 1998) .....</b>	<b>39</b>
<b>Figure 9:</b>	<b>Problème de retour des matériaux de construction (Spengler et al. 1997).....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 10:</b>	<b>Système de logistique inverse en industrie des appareils électriques à Taiwan, Li-Hsing 2000.....</b>	<b>74</b>
<b>Figure 11:</b>	<b>Système de retour des MDR .....</b>	<b>80</b>
<b>Figure 12:</b>	<b>Répartition de la charge sur les centres de traitement .....</b>	<b>89</b>
<b>Figure 13:</b>	<b>Répartition de la charge sur les centres de traitement pour ..</b>	<b>94</b>
<b>Figure 14:</b>	<b>Répartition de la charge sur les centres de traitement pour le scénario 3 .....</b>	<b>97</b>
<b>Figure 15:</b>	<b>Coûts de transport, coûts fixes et coûts totaux pour chacun des scénarios .....</b>	<b>99</b>
<b>Figure 16:</b>	<b>Analyse de sensibilité pour les coûts de transport.....</b>	<b>101</b>
<b>Figure 17:</b>	<b>Analyse de sensibilité pour les coûts fixes.....</b>	<b>102</b>
<b>Figure 18:</b>	<b>L'augmentation des coûts de transport des coûts fixes par tranches.....</b>	<b>103</b>
<b>Figure 19:</b>	<b>Effet de l'augmentation des coûts de transport et des coûts fixes de 10% .....</b>	<b>105</b>
<b>Figure 20:</b>	<b>Variation de pourcentage de l'augmentation des coûts fixes et des coûts de transport entre le scénario 1 et 2.....</b>	<b>105</b>

## **Chapitre 1**

### **Introduction**

Dans ce chapitre, les éléments suivants seront présentés: la définition de la logistique inverse, l'importance de la logistique inverse, la problématique, la méthodologie, les objectifs et les résultats visés.

#### **1.1 Définitions**

La logistique inverse est un concept relativement nouveau qui a tout dernièrement attiré l'attention des logisticiens. Afin de pouvoir bénéficier des opportunités offertes par la chaîne de logistique inverse, il est nécessaire de la définir et de détailler ses constituants.

Rogers et Tibben-Lembke (1998) citent la définition suivante de la logistique inverse. "Le processus de planification, d'implantation et de contrôle avec efficience, du flux rentable de matières premières, des inventaires en cours, des produits finis et l'information pertinente, du point de l'utilisation jusqu'au point d'origine, afin de récupérer la valeur ou de disposer d'une manière adéquate".

Selon Beaulieu (2000), la définition de la logistique inverse est la suivante: La logistique à rebours est un ensemble d'activités de gestion visant la réintroduction d'actifs secondaires dans des filières à valeur ajoutée. La logistique inverse comprend le retour des produits, la récupération, la réutilisation et le recyclage des produits.

Fleischmann et al (1997) classifient la littérature dans le domaine de logistique inverse en trois catégories principales : 1) La distribution inverse (le transport

physique des produits et la localisation des installations), 2) La gestion des inventaires, 3) La planification de la production en réutilisant les matières de retour.

Cette recherche a comme but, le recensement de la littérature concernant le transport en logistique inverse et l'étude des différents modèles mathématiques conçus pour optimiser les systèmes de logistique inverse en minimisant les coûts de transport.

L'étude des différents modèles (dans différents contextes industriels) de distribution, de transport et de localisation des installations, sera effectuée. Ensuite, le choix d'une industrie sera fait et un modèle de programmation linéaire sera développé pour y appliquer les concepts d'optimisation des réseaux de logistique inverse.

## **1.2 Importance de la logistique inverse**

La logistique inverse et les produits de retour ont attiré l'attention des logisticiens, dans les dix dernières années. Cette importance est poussée par des facteurs économiques, environnementaux et législatifs.

Du point de vue économique, les coûts de logistique inverse aux États-Unis, ont été estimés à environ 910 milliards de dollars en 2002, marquant une baisse de 47 milliards de dollars par rapport à l'année 2001. Les coûts de transport en logistique, comptent pour 6% du PIB nominal aux États-Unis en 2000 (Delaney 2003).

Selon les estimations, ces coûts atteignent 35 milliards de dollars par année, représentant environ 4% des coûts de logistique (Stock 2001). Certaines compagnies affrontent une grande difficulté à estimer les coûts des activités de logistique inverse (Rogers et Tibben-Lembke, 1998). Dans certains cas, le pourcentage de retour des produits achetés en ligne, peut atteindre 50%, selon Caldwell (1999) et Krumwiede (2001). L'ampleur de la quantité de retour peut être interprétée par les politiques libérales de retour des détaillants principaux sur le marché mais également par le fait que nous sommes dans une ère de produits inachevés, i.e en évolution continue.

En Europe, une tendance croissante du taux de recyclage est remarquée dans plusieurs secteurs d'industries, pendant la dernière décennie (Fleischmann et al. 1997).

En plus de l'avantage économique réalisé par la réduction des coûts de la logistique inverse, il en existe un autre réalisé par la restauration de la valeur incorporée dans le produit de retour et qui peut retourner dans la production.

Du point de vue écologique, les standards ISO 14000, la chaîne d'approvisionnement verte, et le « Total Quality Environmental Management », sont des notions qui deviennent de plus en plus importantes. Les entreprises sont de plus en plus concernées par l'aspect environnemental qui joue un rôle important dans les stratégies des entreprises (Sarkis 1995).

L'interface entre la logistique et l'environnement réside dans les fonctions d'ajout de valeur, effectuées par l'entreprise. Les polluants sont produits à chaque étape de la chaîne d'approvisionnement. La transformation des ressources en polluants à travers le réseau de logistiques inverse est illustrée dans la figure 1 (Haw-Jan et Steven 1995). Le management environnemental intégré assure que l'impact écologique de chaque élément de la chaîne est minimisé, du début jusqu'à la fin (Haw-Jan et Steven 1995).

L'incorporation des facteurs environnementaux aux politiques de l'entreprise, est essentielle afin de maintenir sa compétitivité sur le marché (Sarkis 1995).

La conscience des entreprises à l'environnement se manifeste également dans les activités de logistique et dans la logistique inverse (Gonzalez-Torre et al. 2002). En plus, pour augmenter leurs chiffres d'affaires, les entreprises doivent rencontrer le besoin croissant du consommateur pour des produits verts. Les décisions stratégiques à long terme devront tenir compte de l'effet du produit sur l'environnement, (Haw-Jan et Steven 1995).

Les législations deviennent de plus en plus rigoureuses, tenant les entreprises plus responsables de leurs sous produits et produits finis (Lee et al. 1998). Donc, la

quantité de produits éliminés ou envoyés aux sites d'enfouissement, devra être réduite significativement (Dowlatshahi 2000). Les gouvernements en Europe et au Canada sont exigeants, en ce qui concerne les matériaux résiduels et leur élimination, surtout quand il s'agit des achats gouvernementaux. Du point de vue économique, les entreprises peuvent réaliser des économies par la réutilisation et le recyclage des matériaux réutilisables, comme illustré dans la figure 1 (Haw-Jan et Steven 1995).

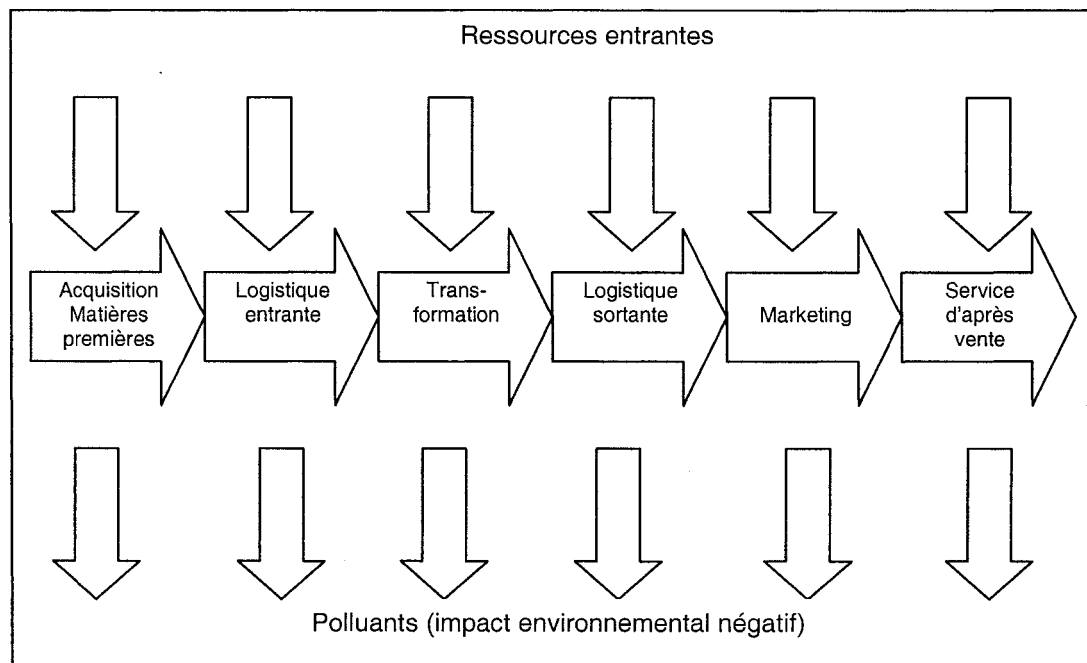


Figure 1: L'influence de la logistique sur l'environnement (Haw-Jan et Steven 1995).

A la lumière de ce qui précède, il est facile de conclure que la gestion avec efficacité des réseaux de logistique inverse peut rapporter des gains importants et augmenter considérablement la compétitivité de l'entreprise. Ce qui aborde dans le même sens que l'étude réalisée par Gonzalez-Torre et al. (2002).

### 1.3 Problématique

La complexité du réseau de logistique inverse provient de la nécessité de gérer le flux de produits à partir du point d'utilisation jusqu'au point d'origine, avec tout ce que cela implique de gérer les tierces parties et les consommateurs. Un modèle générique représentant la chaîne d'approvisionnement illustrant le flux de retour des produits entre les différents éléments de la chaîne, est décrit par la figure 2.

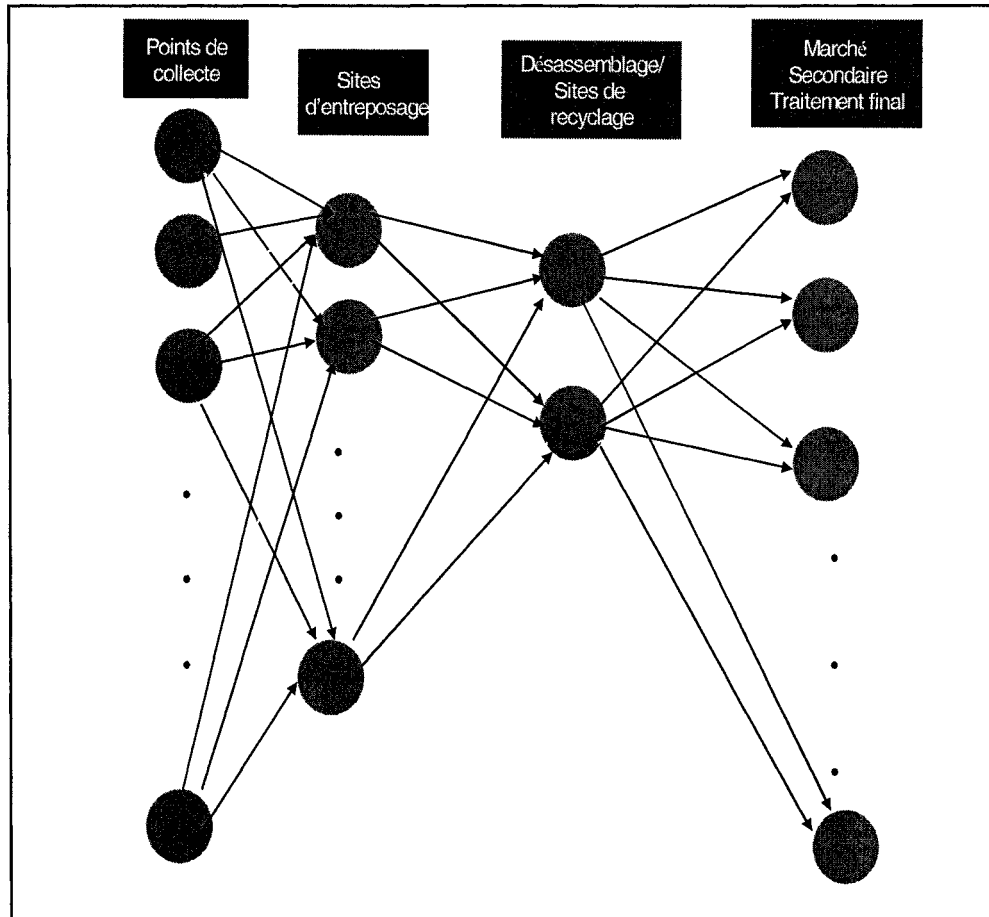


Figure 2: Système de logistique inverse générique

La gestion de ce réseau nécessite un outil de planification qui permet aux gestionnaires d'optimiser leurs chaînes d'approvisionnement. En général, le processus de logistique inverse envisagé, comporte principalement, les activités suivantes : la collecte, le transport, le stockage, le désassemblage, le traitement, la

réutilisation, le recyclage et l'expédition au marché ou à la disposition. Ce processus typique peut être illustré par la figure 3 (Louwers et al. 1999).

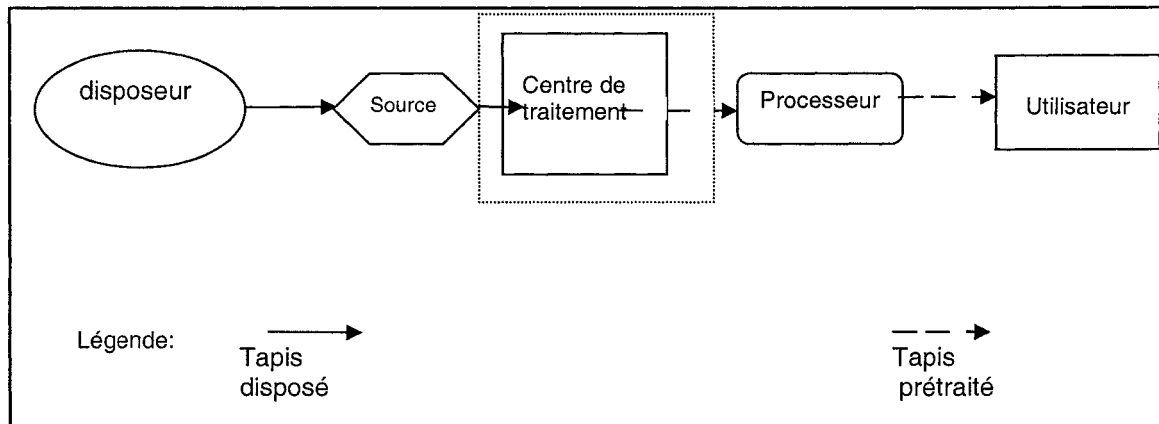


Figure 3: Processus de recyclage des tapis (Louwers et al. 1999).

Le modèle aura comme objectif de déterminer les quantités de produits expédiées traitées et disposées, les points d'origine et de destination, les routages, la localisation des installations et la sélection des sites de disposition.

Des variables continues seront utilisées pour les coûts de collecte, du transport, de stockage, du traitement etc. Des variables entières seront utilisées pour modéliser les quantités de produits. Finalement, des variables binaires seront utilisées pour la sélection des sites et de localisation des installations.

#### 1.4 Objectifs

Afin d'optimiser la chaîne de logistique inverse, il est important de déterminer les facteurs principaux qui l'influencent et de mesurer l'impact de chacun sur les coûts totaux des activités. Par la suite, l'analyse de l'effet de chacun de ces facteurs sur le réseau de logistique inverse doit être faite. Le but est de présenter un modèle qui pourra être utilisé par les gestionnaires des réseaux de logistique inverse pour les aider à les optimiser réseaux. Il est à noter que le modèle pourrait être appliqué dans les industries ayant besoin de la mise en oeuvre d'un réseau de logistique inverse.

### **1.5 La méthodologie**

La première étape de cette étude consiste à réaliser une recherche bibliographique en logistique inverse. Cette étape portera sur la documentation et la compréhension des modèles déjà développés pour résoudre des problèmes similaires de logistique inverse. Une classification des modèles suivant les raisons de retour (recyclage, garantie, matières dangereuses, etc.), sera faite dans le chapitre suivant.

Ces modèles serviront à déterminer les caractéristiques principales de la chaîne de logistique inverse dans les différentes industries, leurs variables principales et les contraintes qui les gouvernent. Ensuite, un modèle mathématique d'optimisation d'un système de logistique inverse, sera développé. Ceci permettra d'effectuer une analyse de sensibilité sur les facteurs pertinents du système. Finalement, l'étude des différents scénarios comportant des changements dans les éléments principaux de la fonction objective sera faite.

### **1.6 Résultats visés**

Suite à la détermination des facteurs d'influence de la chaîne de logistique inverse, les résultats visés sont : la conception optimale de la chaîne de logistique inverse, la sélection des installations, la détermination des quantités acheminées à travers la chaîne, et la conception du routage. L'application du modèle mathématique servira à améliorer l'efficacité des opérations du système de logistique inverse et à trouver la solution la plus économique qui assure le meilleur fonctionnement de ce système.



## **Chapitre 2**

### **Modèles de programmation linéaire en logistique inverse**

#### **Introduction**

Dans ce chapitre, les activités de logistique inverse seront abordées et plusieurs modèles d'optimisation de réseaux de retour seront présentés

#### **2.1 Activités principales de logistique inverse**

Le public devient de plus en plus sensibilisé aux causes environnementales, imposant aux entreprises manufacturières de tenir compte des considérations environnementales en conception (Clegg et Williams 1995). Ceci incite les entreprises à développer et modifier leurs processus manufacturiers pour intégrer la réutilisation, le réusinage, le recyclage et les différentes activités de retour. Notons que ces activités sont en même temps les raisons principales pour planifier et concevoir des systèmes de logistique inverse, au sein de ces entreprises. De même, une tendance croissante du taux de produits de retour a été remarquée, récemment (Guide Jr. 1996).

La logistique inverse étant un nouveau concept en logistique, elle acquiert une importance accrue en industrie. Afin de réussir l'implantation d'un système de logistique inverse, Dowlatshahi (2000) souligne que le transport, le recyclage, le stockage, le réusinage et la gestion de l'approvisionnement sont parmi les facteurs opérationnels les plus importants. De même, il souligne que les systèmes de logistique inverse nécessitent la reconception de la chaîne d'approvisionnement, selon les besoins de gestion de flux de produits de retour destiné au réusinage, recyclage et la disposition, afin d'atteindre une exploitation efficace des ressources.

En mettant l'accent sur l'importance du transport, Melbin (1995) indique que les entreprises qui établissent des systèmes de logistique inverse réalisent des gains provenant du retour sur l'investissement. Les entreprises ayant recourt au réusinage, réalisent des économies estimées entre 40 et 60 % des coûts de l'usinage, par rapport à un produit, fabriqué complètement à neuf. De même, le recourt au réusinage peut réduire la consommation des ressources par un facteur de trois (Kerr et Ryan 2000). En outre, les impacts environnementaux sont réduits significativement. La figure 2-4 montre un processus générique de réusinage.

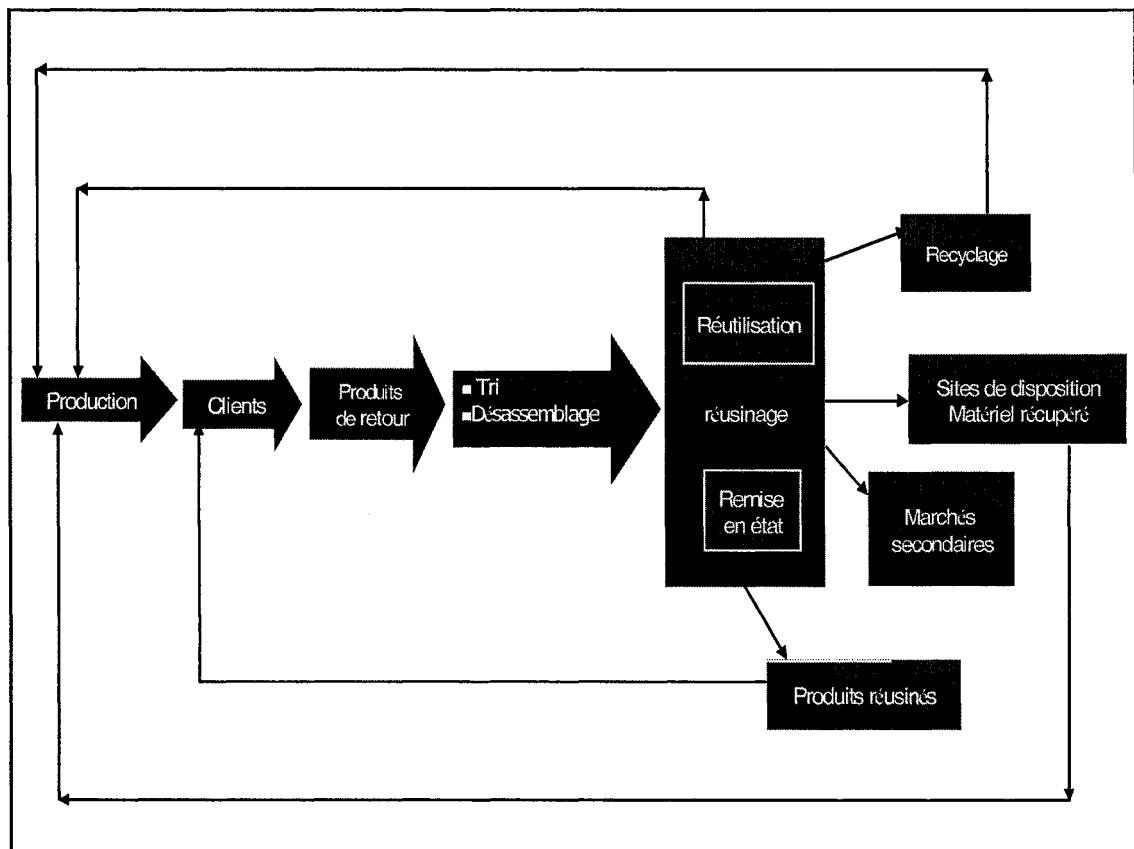


Figure 4: Modélisation (adaptée) d'un processus générique de réusinage (Kerr et Ryan 2000)

## **2.2 Modèles de programmation linéaire en logistique inverse**

Étant donné le besoin accru pour la conception de systèmes de logistique inverse, plusieurs auteurs ont conçu des modèles mathématiques afin d'optimiser les coûts d'opération des réseaux de produits de retour. D'autres modèles sont orientés vers la conception de la structure du réseau de logistique inverse (Krikke 1999), ce qui implique la localisation des installations et des usines constituant le réseau. Dans ce travail, l'étude de plusieurs modèles de logistique inverse, sera menée. La plupart de ces modèles ont été principalement construits pour résoudre des problèmes réels en industrie. La modélisation mathématique des réseaux de logistique inverse, permet d'étudier l'influence des différents facteurs affectant les coûts opérationnels du réseau. En outre, elle permet l'exploration des différentes possibilités et décisions administratives ayant trait à la fois à la structure et aux activités de logistique inverse, et aussi de mesurer leurs impacts sur la solution optimale.

La localisation des installations représente le centre de préoccupation de plusieurs auteurs. Celle-ci est assurée en tenant compte des activités ayant une influence directe sur la localisation tel que : la collecte, le transport, le stockage, etc. Le degré de liberté du choix ou de la sélection des localisations physiques des installations varie d'un cas à l'autre et d'un contexte à l'autre. De même, les éléments de la modélisation et la composition de la fonction objective et des contraintes sont définis suivant les particularités de chaque situation.

Cette section comprend l'étude du problème de logistique inverse correspondant à chaque modèle mathématique étudié, ainsi que sa formulation. De même, l'identification des fonctions de coûts et la présentation des éléments de la modélisation pour chaque situation seront effectuées. Le choix des modèles mathématiques a été fait en sélectionnant ceux qui traitent des problèmes de logistique inverse dans différents contextes et en plusieurs industries. De même, les

méthodes de résolution de chaque problème sont présentées, ainsi que les conclusions finales pour chaque modèle.

Plusieurs modèles étudiés dans ce chapitre sont dédiés à résoudre le problème de retour de produits de fin de vie (PFV). D'autres modèles sont consacrés aux systèmes de conteneurs de retour et des matières dangereuses résiduelles, etc. Les modèles sont regroupés en huit catégories de produits de retour, selon le contexte industriel du problème de logistique inverse. Ces catégories sont les suivantes: 1) les appareils électriques, 2) les conteneurs de retour, 3) les photocopieurs, 4) les matières dangereuses, 5) la fabrication des automobiles 6), les résidus de construction, 7) les déchets urbains solides, 8) les tapis. Le premier modèle présenté traite de problème de retour des appareils électriques à Taiwan.

## **I) Industrie des appareils électriques**

### **2.2.1 Application en industrie des appareils électriques (PFV)**

Li-Hsing Shih et al. (2000)

La définition du problème de retour des appareils électriques à Taiwan, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section suivante.

#### **2.2.1.1 Définition du problème et objectif visé**

Les auteurs utilisent un modèle mathématique linéaire mixte (MILP), afin de déterminer les centres de collecte et de recyclage qui réalisent l'optimalité du réseau de retour des appareils électriques et des ordinateurs à Taiwan.

#### **2.2.1.2 Le modèle**

Le processus de recyclage commence par les centres de collecte, les détaillants, en passant par les sites de stockage, les centres de désassemblage/ recyclage, les terrains de décharge et de traitement final et finalement le marché des matériaux secondaires. Le modèle doit donc assurer la gestion de la totalité du système de logistique inverse.

### 2.2.1.3 La fonction objective et les contraintes

Il s'agit de maximiser les revenus et les subventions d'une part, et de minimiser les coûts de transport, des opérations et les coûts fixes d'autre part.

Les variables de decision

$B_g$	Revenue unitaire de la vente du matériel g
$C_g$	Coût unitaire du traitement du matériel g
$M_{1j}$	Subvention unitaire de la collecte du produit j au point de collecte
$M_{2j}$	Subvention unitaire pour le stockage du produit j au site de stockage
$M_{3j}$	Subvention unitaire pour le recyclage du produit j à l'usine de désassemblage
$TCIS_j$	Coût de transport unitaire pour le produit j (par km), du point de collecte au site de stockage
$TCSP_j$	Coût de transport unitaire pour le produit j (par km), du point de stockage à l'usine de désassemblage
$TCPR_g$	Coût de transport unitaire pour le produit g (par km), de l'usine de désassemblage à la disposition final
$TCIP_j$	Coût de transport unitaire pour le produit j (par km), du point de collecte à l'usine de désassemblage
$D_{is}$	Distance du point de collecte i au site de stockage s
$D_{sp}$	Distance du site de stockage s à l'usine de recyclage p
$D_{ip}$	Distance du point de collecte i à l'usine de recyclage p
$D_{pr}$	Distance de l'usine de recyclage p au site de disposition r
$f_s$	Coûts fixes associés au site de stockage s
$f_p$	Coûts fixes associés à l'usine de recyclage/ désassemblage p
$f_r$	Coûts fixes associés à une faculté de disposition finale
$CC_{1j}$	Coûts opérationnels de la collecte du produit j au point de collecte
$CC_{2j}$	Coûts opérationnels de stockage du produit j au site de stockage
$CC_{3j}$	Coûts opérationnels de recyclage du produit j à l'usine de désassemblage

$A_{ij}$	Nombre estimé du produit j collecté au point de collecte i
$G_{ig}$	Pourcentage du poids du matériel g dans le produit j
MIN <sub>S</sub>	Limite inférieure de la capacité annuelle du site de stockage s
MAX <sub>S</sub>	Limite supérieure de annuelle du site de stockage s
MIN <sub>P</sub>	Limite inférieure de la capacité annuelle de l'usine de recyclage/désassemblage p
MAX <sub>P</sub>	Limite supérieure de la capacité annuelle de l'usine de recyclage/désassemblage p
MIN <sub>R<sub>rg</sub></sub>	Limite inférieure de la capacité annuelle de la faculté de disposition r pour le matériel g
MAX <sub>R<sub>rg</sub></sub>	Limite supérieure de la capacité annuelle de la faculté de disposition r pour le matériel g

La fonction Objective:

$$\text{Max : } \sum_{g \in B1} B_g * L_g - \sum_{g \in B1} C_g * L_g + [\text{revenue et coûts de traitement}]$$

$$\sum_i \sum_j M_{1j} * A_{ij} + \sum_s \sum_p \sum_j M_{3j} * (Y_{spj} + H_{ipj}) - [\text{subvention}]$$

$$\sum_i \sum_s \sum_j (TCIS_j * D_{is} * X_{isj}) - \sum_s \sum_p \sum_j (TCSP_j * D_{sp} * Y_{spj}) -$$

$$\sum_i \sum_p \sum_j (TCIP * D_{ip} * H_{ipj}) - \sum_p \sum_r \sum_l (TCPR_g * D_{pr} * Z_{prg})$$

-[coûts de transport]

$$\sum_{s=n+1}^q f_s * S_s - \sum_{g \in B1} f_p * P_p - \sum_{g \in B1} f_r * R_{rg} - [\text{coûts fixes}]$$

$$\sum_i \sum_j CC1_j * A_{ij} - \sum_i \sum_s \sum_j CC2_j * X_{isj} -$$

$$\sum_s \sum_p \sum_j CC3_j * Y_{spj} + \sum_i \sum_p \sum_j CC3_j * H_{ipj} [\text{coûts d'opération}]$$

Le modèle comprend 3 types de contraintes:

– Contraintes de conservation de flux :

$$\sum_s X_{isj} + \sum_p H_{ipj} = A_{ij} \quad . \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_i X_{isj} = W_{sj} \quad . \quad \forall s, j \quad (3)$$

$$\sum_p Y_{spj} = W_{sj} \quad \forall s, j \quad (4)$$

$$\sum_s Y_{spj} + \sum_i H_{ipj} = V_{pj} \quad . \quad \forall p, j \quad (5)$$

$$\sum_j V_{pj} * G_{jg} = \sum_r Z_{prg} \quad \forall p, g \quad (6)$$

$$\sum_p Z_{prg} = U_{rg} \quad . \quad \forall r, g \quad (7)$$

$$\sum_p U_{rg} = L_g \quad . \quad \forall r, g \quad (8)$$

– Contraintes de capacité:

$$\sum_j W_{sj} \geq \text{MINS} * S_s \quad \forall s \quad (9)$$

$$\sum_j W_{sj} \leq \text{MAXS} * S_s \quad \forall s \quad (10)$$

$$\sum_j W_{sj} = T_s \quad . \quad \forall s \quad (11)$$

$$\sum_j V_{pj} \geq \text{MINP} * P_p \quad . \quad \forall p \quad (12)$$

$$\sum_j V_{pj} \leq P_p \quad . \quad \forall p \quad (13)$$

$$\sum_j V_{pj} = Q_p \quad \forall p \quad (14)$$

$$U_{rg} \geq \text{MINR}_{rg} * R_{rg} \quad . \quad \forall r, g \quad (15)$$

$$U_{rg} \leq \text{AXR}_{rg} * R_{rg} \quad . \quad \forall r, g \quad (16)$$

– Contraintes sur le nombre des installations :

$$\sum_{s=n+1}^q S_s \leq h1 \quad (17)$$

$$\sum_{p=m+1}^k P_p \leq h2 \quad (18)$$

$$\sum_{r=d+1}^v R_{rg} \leq h3 \quad (19)$$

Équation (2)	Assure la conservation du flux
Équation (3, 4)	Assure la conservation du flux aux sites de stockage et enregistre la quantité totale qui passe à travers le réseau de retour
Équation (5)	Assure la conservation de masse à l'usine de désassemblage/ recyclage p
Équation (6)	Le g <sup>ème</sup> matériel quittant l'usine p
Équation (7, 8)	Matériel dirigé aux sites terminaux de disposition. Le matériel peut être expédié aux marchés secondaires aux sites d'enfouissement ou aux usines de traitement
Équation (9, 10, 11)	Limites de capacité des sites de stockage
Équation (12, 13, 14)	Limites de capacité des usines de désassemblage/ recyclage
Équation (15,16)	Limites contraignant les quantités expédiées aux sites d'enfouissement
Équation (17, 18, 19)	Limites supérieures sur les nombres de nouvelles installations

#### 2.2.1.4 Conclusion et résultats

Les résultats sont la détermination du nombre de sites de stockage, de désassemblage et de recyclage, pour différents scénarios, ainsi que la détermination des quantités traitées dans chaque installation.

## II) Conteneurs de retour

### 2.2.2 Optimisation du système de Conteneurs de retour

Leo Kroon & Gaby Vrijens (1995)

La définition du problème de conteneurs de retour aux Pays-Bas, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section suivante.



### 2.2.2.1 Définition du problème et objectif visé

Il s'agit de déterminer la localisation et le nombre d'entrepôts de conteneurs ainsi que les frais des services de distribution et de collecte dans le système de logistique inverse de conteneurs de retour. Le système de retour des contenants est présenté à la figure 5.

### 2.2.2.2 Le modèle

Le système comprend des expéditeurs et des récepteurs. Une agence de service de logistique effectue le transport des conteneurs à partir des centres d'entreposage jusqu'aux expéditeurs et la collecte de chez les récepteurs. La livraison entre les expéditeurs et les récepteurs peut être effectuée par une autre organisation. La gestion des informations est effectuée par l'agence possédant les conteneurs.

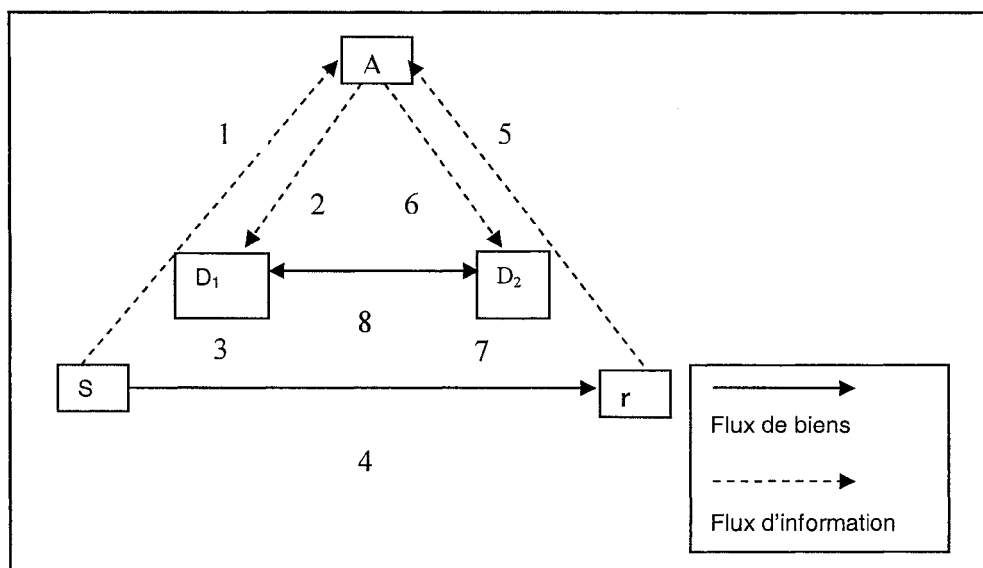


Figure 5: Réseau de retour des conteneurs (Leo Kroon & Gaby Vrijens, 1995)

### Paramètres

- $G_s$  la quantité annuelle de produits transportés entre l'expéditeur  $s$  et le récepteur  $r$
- $B_{sr}$  le nombre annuel des conteneurs transportés entre l'expéditeur  $s$  et le récepteur  $r$
- $FC_d$  fixes associés à un dépôt de conteneur à un centre de distribution  $d$
- $DC_{ds}$  coûts d'envoi d'un conteneur d'un centre de distribution  $d$  vers un expéditeur  $s$
- $CC_{rd}$  coûts de collecte et de transport d'un conteneur du récepteur  $r$  vers un centre  $d$
- $RC_{dc}$  coûts de la relocalisation d'un conteneur du centre de distribution  $d$  vers un centre de collecte  $c$

### 2.2.2.3 La fonction objective et les contraintes

La fonction objective tient compte des coûts de collecte, des coûts de la distribution, ainsi que des coûts de la relocalisation des conteneurs et des coûts fixes des entrepôts.

$L_d$  = variable 0/1 indique si le centre de distribution  $d$  sera un entrepôt de conteneurs

$D_{ds}$  = le nombre de conteneurs envoyés du centre de distribution  $d$  vers l'expéditeur  $s$

$C_{rd}$  = le nombre de conteneurs collectés chez un receveur  $r$  et transportés vers un centre de distribution  $d$

$R_{dc}$  = le nombre de conteneurs relogés du centre de distribution  $d$  vers  $c$

En terme de variables décisionnelles, le problème de minimisation des coûts totaux de logistique peut être formulé comme suit :

$$\text{Min} \sum_d \sum_{sd} DC_{ds} * D_{ds} + \sum_d \sum_r CC_{rd} * C_{rd} + \sum_d \sum_c RC_{dc} * R_{dc} + \sum_d FC_d * L_d \quad (3)$$

Sujet à :

$$\sum_d D_{ds} = \sum_r B_{sr} \quad \forall Ss \quad (4)$$

$$\sum_d C_{rd} = \sum_s B_{sr} \quad \forall r \quad (5)$$

$$\sum_c C_{rd} = \sum_s B_{sr} \quad \forall d \quad (6)$$

$$\sum_c R_{dc} = \sum_r C_{rd} \quad \forall d \quad (7)$$

$$\sum_s R_{dc} = \sum_s C_{rd} \leq K * L_d \quad \forall d \quad (8)$$

$$L_d \in \{0,1\} \quad \forall d \quad (9)$$

$$\text{Toutes les variables} \geq 0 \quad (10)$$

#### 2.2.2.4 Méthode de résolution

En utilisant la méthode Dual-based Procedure for Uncapacitated Facility Location, développée par Erlmkotter (1993), plusieurs scénarios sont simulés par la fonction objective selon le rapport entre le nombre de conteneurs et la quantité des produits transportés en solutionnant la fonction objective d'une façon itérative jusqu'à atteindre l'optimalité.

#### 2.2.2.5 Résultats et conclusion

Le résultat est la détermination du nombre d'entrepôts et leurs localisations.

#### 2.2.2.6 Remarque

Le modèle nécessite d'être plus raffiné, mais représente un outil d'analyse fiable.

### III) Photocopieurs

#### 2.2.3 Cas d'étude en industrie de photocopieurs

H.R. Krikke, A. van Harten, P.C. Schuur (1999)

La définition du problème de retour des photocopieurs chez Océ, ainsi que le modèle et ses résultats seront présentés dans la section suivante.

### 2.2.3.1 Définition du problème et objectif visé

L'objectif consiste à étudier l'effet du transfert de certaines activités ayant lieu originellement au Pays-Bas, à la République Tchèque. Il s'agit des processus de réassemblage, de préparation et de récupération des photocopieuses. Le système de logistique inverse des photocopieurs, installé chez Océ, est présenté par la figure 6.

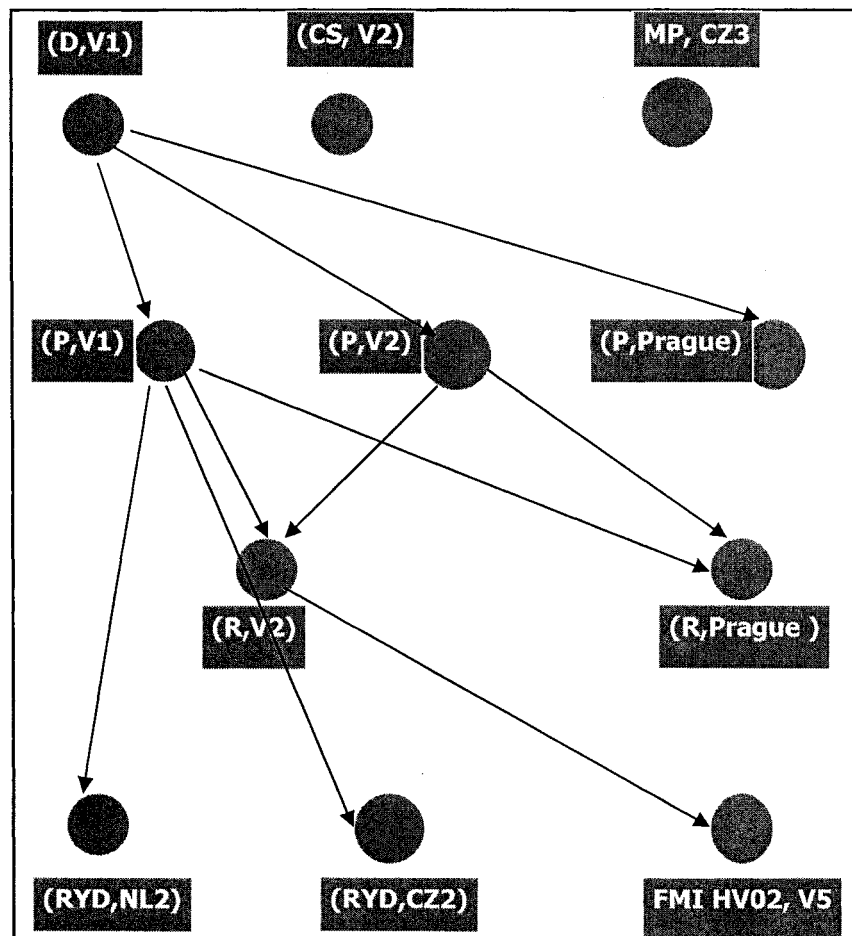


Figure 6: Réseau de retour des photocopieurs chez Océ (Krikke et al. 1999)

V1, V2	Installations à Venlo au Pays-Bas
NL1, NL2	Installations au Pays-Bas
CZ1, CZ2, CZ3	Installations au République Tchèque
P	Processus de préparation
R	Processus de réassemblage
FMI	Stock de produits finis
RYD	Installations de recyclage

### 2.2.3.2 Le Modèle

Le modèle présenté est un modèle linéaire mixte. Les processus suivants, doivent être modélisés : Le retour des machines, la réparation, la préparation, le stockage, le transport, le démantèlement. La formulation doit aussi tenir compte de la production et de la disposition.

### 2.2.3.3 La fonction objective et les contraintes

Le modèle doit optimiser le processus de retour des photocopieurs, comprenant la localisation des installations en minimisant les coûts de traitement, de transport et du maintien d'inventaire.

Indices:

P	Processus $p=p_s, p_1, p_2, p_m$
F	Localisation d'une installation, $f=f_1, f_2, f_3$ (Venlo1, Venlo2, Prague)
F(p)	Ensemble de solutions faisables des localisations f pour le processus p, $F(p_1)=\{f_1, f_2, f_3\}$ , $f(p_2)=\{f_2, f_3\}$
k	Installation (p, f), $f \in F(p)$ , $k_1=(p_1, f_1)$ , $k_2=(p_1, f_2)$ , $k_3=(p_1, f_3)$ , $k_4=(p_2, f_2)$ , $k_5=(p_2, f_3)$
$p_k$	Processus p de l'installation k
K(p)	Toutes installations k avec $p_k=p$
S	Localisation de fourniture, $s=s_1, s_2, s_3$ (Venlo1, venlo2, CZ <sub>3</sub> )
D	Installation de demande, $d=d_1, d_2, d_3$ (Venlo5, NL <sub>2</sub> , CZ <sub>2</sub> )
m	Marché secondaire , $m=m_1, m_3$ (HV02, pièces de recyclage)
t	Processus de fournitures, $t= t_1, t_2$ (processus de fournitures, module fin jumeaux)
IN(k)	Stock tampon entrant de flux de retour à l'installation k
OUT(k)	Stock tampon sortant de flux de retour à l'installation k
IN(t, k)	Stock tampon entrant de processus t à l'installation k

OUT(t, s)	Stock tampon sortant de flux de retour à l'installation t de fourniture s
OUT(s)	Stock tampon sortant de flux de retour à l'installation de fourniture s
IN(pm,d)	Stock tampon entrant de flux de retour au point de demande ( $p_m$ , d)
FIX <sub>k</sub>	Constante de coûts annuels de traitement lorsqu'une installation k est ouverte, en excluant les coûts d'investissement

Paramètres :

$C_k^t$	Coût unitaire de traitement du produit de retour à l'installation k
$C_{sk}$	Coût unitaire de transport du produit de retour de l'installation k
$C_{kd}$	Coût unitaire de transport du produit de retour de l'installation k au point de demande d
$C_{sk}^t$	Coût unitaire de transport de fournitures t du point de fourniture s à l'installation k
$C^{in(k)}$	Coûts annuels de maintien de flux de produit de retour entrant l'installation k
$C^{in(out)}$	Coûts annuels de maintien de flux de produit de retour sortant de l'installation k
$C^{in(s)}$	Coûts annuels de maintien de flux de produit de retour sortant du point de fournitures s
$C^{in(m)}$	Coûts annuels de maintien de flux de produit de retour prêt à être utilisé au marché m
$ch^t$	Coûts annuels de maintien de fournitures du processus t
$\lambda_{sk}$	Nombre moyen de journées entre 2 transports de s à k divisé par (2*365)

$\lambda_{kj}$	Nombre moyen de journées entre 2 transports de k à j divisé par (2*365)
$\lambda_{kd}$	Nombre moyen de journées entre 2 transports de k à d divisé par (2*365)
$u(p_s, p)$	Fraction de flux de produit de retour à l'installation de fourniture s, fourni au processus p installé à une installation k, $k \in k(p)$
$v(p_k, p_m)$	Fraction de flux de produit de retour traité par le processus $p_k$ à l'installation k, à être traité par le processus p à une des facilités
$u^t(p_s, p_{ki})$	Nombre d'unités de fournitures de processus t fournis à partir de s, requis lorsqu'une unité de flux de produit de retour est sujet au processus $p_k$ installé à k
$V_s$	Fourniture annuelle de flux de produit de retour au point de fourniture s
$V_d^m$	Demande annuelle de marché m à l'installation d
$V_s^t$	Fourniture maximale annuelle possible pour le traitement des fournitures t aux installations s
M	Très grand nombre
Variables de décision	
$X_k$	Nombre total d'unités de flux de retour, traitées à l'installation k par an
$Y_k$	Booléen dont la valeur égale à 1 si l'installation est utilisée, autrement elle est égale à 0
$X_{sk}$	Nombre total d'unités de flux de produit de retour du point de fournitures à l'installation k par an
$X_{kj}$	Nombre total d'unités de flux de retour transportés de l'installation k à l'installation j par an
$X_{kdm}$	Nombre total d'unités de flux de retour transportés de

	l'installation k au marché m par an
$X_{sk}^t$	Nombre total d'unités de fournitures de processus, t fournis du point de fourniture s à l'installation k par an
$X^{in(k)}$	Nombre moyen d'unité de flux de retour stocké en tampon entrant à une installation k
$X^{in(t,k)}$	Nombre moyen d'unités de fourniture du processus t stockées en tampon sortant à l'installation de fourniture s
$X^{out(k)}$	Nombre moyen d'unité de flux de retour stockées en tampon sortant à une installation k
$X^{out(t,s)}$	Nombre moyen d'unités de fourniture du processus t stockées en tampon sortant à l'installation de fourniture s
$X^{out(s)}$	Nombre moyen d'unités de flux de retour stockées en tampon sortant à une installation de fourniture s
$X^{in(pm,d)}$	Nombre moyen d'unités de fourniture du processus t stockées au tampon entrant au point de demande (p <sub>m</sub> , d)

L'objectif est de minimiser les coûts totaux (coûts de traitement + coûts de transport + coûts de stockage).

$$\begin{aligned}
 MinZ = & \sum_k C_k * X_k + \sum_k FIX_k * y_k \\
 & + \sum_s \sum_k C_{sk} * X_{sk} + \sum_k \sum_J C_{KJ} * X_{kJ} + \sum_k \sum_d \sum_m C_{kd} * X_{kdm} \\
 & + \sum_t \sum_s \sum_k C_{sk}^t * X_k^t + \sum_k C^{in(k)} * X^{in(k)} + \sum_k ch_{sk}^{out(k)} * X^{out(k)}
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& + \sum_t \sum_s ch^t * X^{out(t,s)} + \sum_t \sum_k ch^t * X^{in(t,k)} \\
& + \sum_s ch^{out(s)} * X^{out(t,s)} + \sum_d \sum_m ch^{in(m)} * X^{in(pm,d)}
\end{aligned} \tag{1}$$

Contraintes:

$$V_d^m = \sum_{k, pk=p2} X_{kdm} \tag{2}$$

$$V_d^m \geq \sum_{k, pk=p1} X_{kdm} \tag{3}$$

$$X_k * w(pk, pm) = \sum_d X_{kdm} \quad \forall k \quad \forall m \tag{4}$$

$$X_k * v(ps, p) \geq \sum_{j \in k(p)} X_{kj} \quad \forall k \quad \forall p \neq p_k \tag{5}$$

$$V_s * u(ps, p) \geq \sum_{k \in k(p)} X_{sk} \quad \forall s \quad \forall p \tag{6}$$

$$X_k = \sum_s X_{sk} + \sum_{j \neq k} X_{jk} \quad \forall k \tag{7}$$

$$V_s^t \geq \sum_k X_{sk} \quad \forall t \quad \forall s \tag{8}$$

$$X_{sj}^t = X_k * u^t(ps, pk) \quad \forall t \quad \forall s \quad \forall k \tag{9}$$

$$X^{in(k)} = \sum_s X_{sk} * \lambda_{sk} + \sum_{j \neq k} \lambda_{jk} X_{jk} \quad \forall k \tag{10}$$

$$X^{out(k)} = \sum_{j \neq k} X_{sk} * \lambda_{sk} + \sum_d \sum_m X_{kdm} \lambda_{kd} \quad \forall k \quad (11)$$

$$X^{in(t,k)} = \sum_s X_{sk}^t * \lambda_{sk} \quad \forall t \forall k \quad (12)$$

$$X^{out(t,s)} = \sum_k X_{sk}^t * \lambda_{sk} \quad \forall t \forall s \quad (13)$$

$$X^{out(s)} = \sum_k X_{sk} * \lambda_{sk} \quad \forall k \quad (14)$$

$$X^{in(pm,d)} = \sum_k X_{kdm} * \lambda_{kd} \quad \forall m \forall d \quad (15)$$

$$Y_k * M \geq X_{kdm} \quad \forall k \quad (16)$$

$$\sum_{k, k_p=p} Y_k = 1 \quad \forall m \forall d \quad (17)$$

$$Y_{k2} = Y_{k4} \quad (18)$$

$$Y_{k2} + Y_{k3} = Y_{k4} \quad (19)$$

$$Y_k = 0,1 \quad (20)$$

contraintes 2 à 7	Assurent que l'entrée et la sortie des produits sont équilibrées en fonction des stratégies de récupération désignées
contraintes 8 et 9	Garantissent que l'approvisionnement suffisant est assuré au processus
contraintes 10 à 15	Assurent l'ajustement de la quantité d'inventaires tampon
contraintes 16 et 17	Assurent qu'une seule installation est ouverte par processus
contraintes 18 et 19	Mettent une limitation sur la combinaison des processus dans une certaine installation

### 2.2.3.4 Méthode de solution

La solution a été obtenue en utilisant le logiciel d'optimisation LINDO

### **2.2.3.5 Résultats et conclusion**

Il est plus économique d'effectuer les deux processus dans une seule installation que de les séparer, à cause de l'augmentation des coûts totaux entraînée par les frais de transport et d'inventaires.

## **IV) Matières dangereuses**

### **2.2.4 Conception des réseaux de retour**

Vaidyanathan Jayaraman et al. (2003)

La définition de ce problème de retour des produits en fin de vie, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section suivante.

#### **2.2.4.1 Définition du problème et objectif visé**

L'objectif est d'effectuer la formulation d'un système de logistique inverse complexe, avec un grand nombre d'installations.

#### **2.2.4.2 Le modèle**

L'objectif est tout d'abord de modéliser les coûts de transport entre les installations d'origine aux installations de destination : à partir des centres d'origines (les grossistes), vers les centres de collecte et jusqu'aux centres de destination. Le modèle prend aussi en considération les coûts d'inauguration. Des variables binaires sont associées à l'inauguration des installations et des variables continues sont allouées aux quantités.

I Site d'origine

J Site de collecte

K Site de remise en état

Paramètres :

$F_j$  Coûts d'ouverture d'un site de collecte j

$G_k$  Coûts d'ouverture d'un site de remise en état k

$a_i$  Nombre de produits dangereux qui sont stockés au site d'origine i

$B_j$  Capacité maximale du site de collecte j

- $D_k$  Capacité maximale de site de remise en état k  
 $P_{\min}$  Nombre minimum de sites de collecte à ouvrir  
 $P_{\max}$  Nombre maximum de sites de collecte à ouvrir  
 $Q_{\min}$  Nombre minimum de sites de remise en état  
 $Q_{\max}$  Nombre maximum de sites de remise en état  
 $B_o$  très grand nombre  
 $X_{ijk}$  Les unités provenant du site i d'origine, transportées vers le site de remise en état k, en passant par le site de collecte j

$$P_j = \begin{cases} 1 & \text{si le site de collecte } j \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

$$Q_k = \begin{cases} 1 & \text{si le site de remise en état } k \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

- $C_{ijk}$  Coûts variables totaux de transport d'une unité de produit de retour provenant du site d'origine i à travers le site de collecte j, vers le site de remise en état k

#### 2.2.4.3 La fonction objective

Minimiser les coûts de transport entre les origines et les destinations

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j \sum_k C_{ijk} a_i X_{ijk} + \sum_j F_j P_j + \sum_k G_k Q_k$$

Contraintes : une explication est présentée à la suite de chaque contrainte

$$\sum_j \sum_k X_{ijk} = 1 \quad \forall i \quad (1)$$

Chaque produit sortant des origines doit passer par les destinations.

$$\sum_j \sum_k a_i X_{ijk} \leq B_j \quad \forall j \quad (2)$$

Limitation sur les unités envoyées aux centres de collecte à leurs capacités

$$\sum_j \sum_k a_i X_{ijk} \leq D_k \quad \forall k \quad (3)$$

Limitation sur le nombre des unités envoyées aux centres de destination à leur capacité

$$X_{ijk} \leq P_j \quad \forall i, j, k \quad (4)$$

$$X_{ijk} \leq Q_k \quad \forall i, j, k \quad (5)$$

Empêcher l'envoi de produits à un centre de destination s'il n'est pas inauguré

$$P_{\min} \leq \sum_j P_j \leq P_{\max} \quad (6)$$

Assurer que le nombre de centres de collecte reste dans les limites

$$Q_{\min} \leq \sum_k Q_k \leq Q_{\max} \quad (7)$$

Limitation sur le nombre minimum des sites de destination restant ouverts et le nombre maximum de sites à ouvrir

#### 2.2.4.4 Méthode de résolution

Il s'agit de décomposer le problème en sous problèmes et les solutionner itérativement jusqu'à l'optimalité. L'heuristique utilisée est celui de Rosing et ReVelle (heuristique de concentration) et le logiciel d'optimisation est CPLEX.

#### 2.2.4.5 Conclusion et résultats

La recherche a abouti à la détermination du nombre optimal des installations de collecte et de remise en état.

#### **2.2.4.6 Commentaires**

Contrairement au modèle précédent de Louwers et al. (1999), ce modèle sert à la localisation des sites en respectant une contrainte sur le nombre des installations.

### **2.2.5 Modèle combiné pour la localisation et le routage**

Zografos & Samara (1990)

La définition du problème de retour des matières dangereuses, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section suivante.

#### **2.2.5.1 Définition du problème et objectif visé**

Déterminer le routage et la localisation des installations d'un système de transport des résidus dangereux.

#### **2.2.5.2 Le Modèle**

Le modèle a comme objectif de minimiser le risque de transport, le temps de voyage et d'éloigner l'acheminement des matières dangereuses des villes. Ceci est possible en combinant deux critères : la localisation et le routage.

#### **2.2.5.3 La fonction objective et les contraintes**

Pour la formulation, les auteurs ont eu recours à la programmation multi-objectifs et pour ce faire, la technique Goal Programming est utilisée pour minimiser la somme des déviations par rapport aux niveaux des valeurs objectives prédéfinies.

- $d_1$  Déviation du premier objectif
- $d_2$  Déviation du deuxième objectif
- $d_3$  Déviation du troisième objectif
- $P_1$  Facteur correspondant à la priorité du premier objectif
- $P_2$  Facteur correspondant à la priorité du deuxième objectif
- $P_3$  Facteur correspondant à la priorité du troisième objectif
- $S_{ij}$  Distance entre le nœud  $i$  et les sites de disposition

$X_{ij}$	Quantité de flux sur le lien $ij$
$Y_{ij}$	=1 si le nœud $i$ est assigné au nœud $j$ , 0 autrement
$S$	Niveau maximum à atteindre pour le premier objectif
$R$	Niveau maximum à atteindre pour le deuxième objectif
$T$	Niveau maximum à atteindre pour le troisième objectif
$t_{ij}$	Temps de transport entre le nœud $i$ et le nœud $j$
$m$	Nombre de sites de disposition

$$\text{Min } F = P_1 d_1 + P_2 d_2 + P_3 d_3 \quad (1)$$

Contraintes :

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in C} S_{ij} Y_{ij} + d_1^- \geq S \quad (2)$$

$$[\sum_{(i,j) \in N} \sum (X_{ij} R_{ij}) + [\sum_{(i,j) \in N} \sum (X_{ij} W_j)] - d_2^+ \leq R \quad (3)$$

$$(\sum_{(i,j) \in N} X_{ij} t_{ij}) - d_3^+ \leq T, \forall i, j \quad (4)$$

$$[\sum_{k \in C^*} S_{IK} Y_{IK}] + (M - S_I) Y_{jj} \leq M \quad i \in N, j \in C^* \quad (5)$$

$$\sum_{j \in C^*} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{j \in C^*} Y_{ij} = m \quad (7)$$

$$Y_{jj} = Y_{ij} \quad \forall i \in N, \forall j \in C^+ \quad (8)$$

$$[\sum_{i \in S_k^*} X_{Ki} - \sum_{i \in N_k} X_{ik}] = d_k k K^* \quad (9)$$

$$[\sum_{i \in S_k^*} X_{Ki} - \sum_{i \in N_k} X_{ik}] = OK(n - C^* - K^*) \quad (10)$$

$$[\sum_{i \in n_k} X_{ik} - \sum_{i \in S_k} X_{Ki}] = C_k Y_{kk} k C^* \quad (11)$$

$$X_{ij} \leq U_{ij}, \quad \forall i \in N, \forall j \in C^+ \quad (12)$$

contraintes 2, 3 et 4	correspondent aux trois objectifs du modèle CLR
contrainte 5	impose qu'à chaque ville (i) soit assigné le plus proche site de disposition ouvert
contrainte 6	assure qu'à chaque ville soit assigné un seul site de disposition
contrainte 7	assure qu'un nombre m de sites de disposition soit exactement localisé
contrainte 8	restreint l'assignation des centres de population uniquement aux sites de disposition ouverts
contraintes 9, 10 et 11	la conservation de flux à travers le réseau
contrainte 12	concerne la restriction sur la capacité

#### **2.2.5.4 Méthode de résolution**

Les auteurs ont utilisé un réseau hypothétique contenant des noeuds représentant les sites de génération de résidus et les sites de disposition avec plusieurs scénarios dont les objectifs sont différents.

L'outil de programmation : UNIVAC/FMPS est utilisé pour la formulation du problème.

#### **2.2.5.5 Résultats et conclusion**

Le scénario 1 réalise l'objectif de transport. Le scénario 2 réalise l'objectif de routage. Le scénario 3 réalise l'objectif de temps de voyage. Pour chaque scénario, localisation des sites de disposition a été déterminée ainsi que les centres de population et le routage suivant lequel le résidu sera transporté.

#### **2.2.6 Modèle de minimisation des coûts de logistique inverse**

Tung-Lai Hu, Jih-biing Sheu, Kuan-Hsiung Huang, (2002)

La définition du problème de retour des matières dangereuses au Taiwan, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section suivante.



### 2.2.6.1 Le Modèle

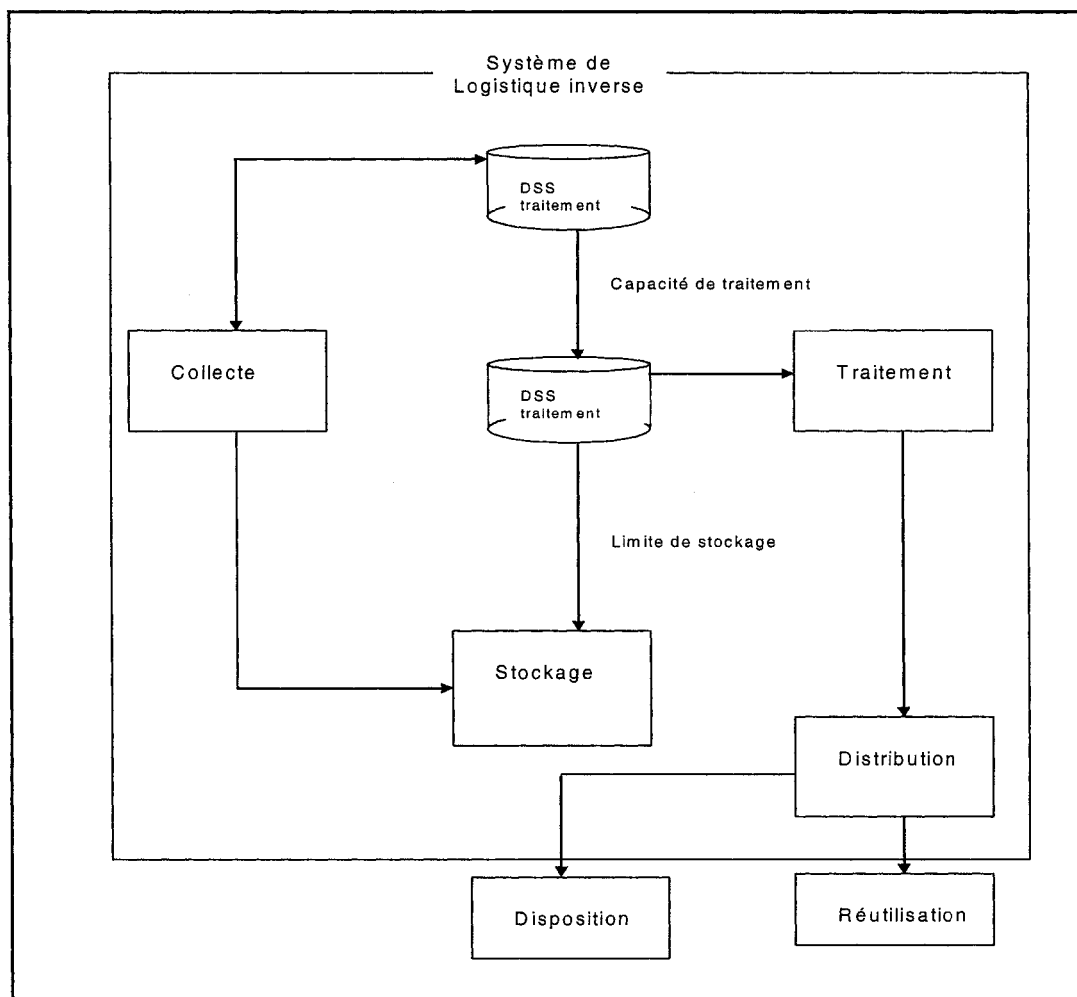


Figure 7: Modèle de retour des matières dangereuses. (Tung-Lai Hu et al 2002)

### 2.2.6.2 Définition du problème et objectif visé

L'objectif est la création d'un modèle de minimisation des coûts du système de logistique inverse et de traitement des résidus dangereux.

Le modèle multi-étapes, multi-temps et multi-types est en temps discret et consiste en quatre opérations principales : La collecte, le stockage, le traitement et la distribution, se concentrant sur le flux physique entre les différentes activités du niveau du système, tout en respectant les règlements limitant les quantités

minimales des résidus traités. La figure 7 montre le système de retour des matières dangereuses selon Tung-Lai Hu et al. (2002).

La fonction objective:

$a_i$	Coût unitaire de stockage associé à un certain type de matières dangereuses $i$
$b_i$	Coût unitaire de traitement d'un type de matières dangereuses $i$
$t_i^c$	Le coût unitaire de transport d'un certain type de matières dangereuses $i$ pour l'activité de collecte $c$
$t_i^d$	Le coût unitaire de transport d'un certain type de matières dangereuses $i$ pour l'activité de disposition $d$
$t_i^r$	Le coût unitaire de transport d'un certain type de matières dangereuses $i$ pour l'activité de réutilisation $r$
$w_i^d$	Le rapport entre la quantité entrée et la quantité sortie associée à un certain type de matières dangereuses $i$ traitée pour l'activité de disposition $d$
$w_i^r$	Le rapport entre la quantité entrée et la quantité sortie associée à un certain type de matières dangereuses $i$ traitée pour l'activité de réutilisation $r$
$d_i$	Coût unitaire de disposition associé à un type de matières dangereuses $i$
$I$	Le nombre total de types de matières dangereuses
$I_\gamma$	Un sous-ensemble de $I$ représentant le nombre total de types de matières dangereuses traitées directement pour la réutilisation
$l_i^c$	La distance de transport correspondante à un certain type de matières dangereuses $i$ , destiné à l'activité de collecte $c$
$l_i^r$	La distance de transport correspondante à un certain type de matières dangereuses $i$ , destiné à l'activité de réutilisation $r$
$l_i^d$	La distance de transport correspondante à un certain type de matières dangereuses $i$ , destiné à l'activité de disposition $d$
$M_{com}^c$	La quantité collectée minimale de matières dangereuses prédéfinie par une compagnie de traitement de matières dangereuses
$M_{gov}^c$	La quantité collectée minimale de matières dangereuses requise par le gouvernement
$M_{com}^T$	La quantité traitée minimale de matières dangereuses prédéfinie par une compagnie de traitement de matières dangereuses
$M_{gov}^T$	La quantité traitée minimale de matières dangereuses requise par le

gouvernement

$R_i(k)$  La quantité de matières dangereuses  $i$  demandée à la source à l'étape  $k$

$S_i(0)$  La quantité stockée d'un certain type de matières dangereuses  $i$  à l'étape 0

$S_i^{cap}$  La capacité de stockage associée à un type de matières dangereuses  $i$

$T_i^{cap}(k)$  La quantité de matière première correspondante à un certain type de matières dangereuses  $i$  traitée à l'étape  $k$

$C_i(k)$  La quantité de matière première correspondante à un certain type de matières dangereuses  $i$  collectée à l'étape  $k$

$T_i^{cap}$  La capacité de traitement associé à un certain type de matières dangereuses  $i$

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I f * l_i^c * c_i(k) + \sum_{i=1}^I a_i * \left\{ S_i(0) + \sum_{k=0}^{k-1} [C_i(k+1) - T_i(k+1)] \right\} +$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I b_i * T_i(k) \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^{I_r} t_i^r * l_{ji}^r * \omega_i^r * T_i(k) + \sum_{k=1}^K \sum_{i=I_r^*+1}^I (t_i^d * l_i^d + d_i) * [\omega_i^d * T_i(k)]$$

L'objectif est de minimiser les coûts totaux de collecte, de stockage, du traitement et du transport.

Les contraintes:

1- La limite inférieure (réglementaire & économique) de la quantité traitée

$$\sum C_i(k) \geq \max\{M_{gov}^c, M_{com}^c, 0\} \quad \forall i, k$$

2- La limite supérieure sur la quantité collectée

$$C_i(k) \leq \min\{R_i(k), T_i^{cap}, \} \quad \forall i, k$$

3- La limite inférieure sur la quantité à traiter

$$\sum T_i(k) \geq \max\{M_{gov}^T, M_{com}^T, 0\} \quad \forall k$$

4- La limite supérieure sur la quantité à traiter

$$T_i(k) \leq T_i^{cap}, \quad \forall i, k$$

5- La quantité stockée doit correspondre à la capacité de stockage

$$S_i(k-1) + [C_i(k) - T_i(k)] \leq S_i^{Cap}, \quad \forall i, k$$

6- La quantité stockée doit être inférieure à la limite de stockage

$$S_i(k) \leq S_{safe}, \quad \forall k$$

#### **2.2.6.3 Méthode de résolution**

Le logiciel Lindo a été utilisé pour atteindre la solution optimale.

#### **2.2.6.4 Résultats et conclusions**

La conclusion est la détermination des quantités de collecte, de stockage et de traitement à chaque étape.

### **V) Industrie de la fabrication des automobiles**

#### **2.2.7 Conception de réseau en logistique inverse : modèle quantitatif**

H.R. Krikke, E. J. Krooi & P.C. Schuur (1999)

La définition du problème de retour dans l'industrie de la fabrication des automobiles, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section suivante.

##### **2.2.7.1 Définition du problème et objectif visé**

L'objectif est de concevoir et d'optimiser le réseau de retour des produits dans l'industrie de fabrication des automobiles ainsi que la localisation des installations et le routage.

##### **2.2.7.2 Le modèle**

Le modèle comprend les fournisseurs de produits, les centres de traitement et les récepteurs.

##### **2.2.7.3 La fonction objective et les contraintes**

La fonction objective minimise les coûts de traitement, les coûts d'entrée des produits, les coûts d'investissement et les coûts de livraison aux clients.

$f$	Type d'installation, $f=f_1 \dots f_F$
$loc$	Localisation, $loc=loc_1 \dots loc_L$
$CI_{f,loc}$	Coûts d'investissement associés à l'installation de type $f$ à la localisation $loc$
$P$	Routage des activités de traitement $p=p_1 \dots p_2$
$r$	Options de recyclage, $r=r_1 \dots r_R$
$s$	Point de fourniture, $s=s_1 \dots s_S$
$c$	Point de consommation, $c=c_1 \dots c_C$
$CP_{pr}$	Coûts de traitement correspondants à l'option de recyclage $r$ via le routage $p$
$CE_{prs}$	Coûts d'utilisation correspondants à l'option de recyclage $r$ via le routage $p$ , pour la fourniture des produits à partir du point $s$
$CD_{prc}$	Coûts de livraison correspondants à l'option de recyclage $r$ via le routage $p$ , pour un consommateur $c$
$V_{sr}$	Produits assignés à l'option de recyclage $r$ au point de fourniture $s$
$D_{cr}$	Demande sur les produits sortant de l'option de recyclage $r$ au point de consommation $c$
$M_{rpfloc}$	1 si $(f, loc)$ est alloué à $p$ , pour l'option de recyclage $r$ ; 0 autrement
$XE_{prs}$	La quantité de produits provenant du point de fourniture $s$ , assignée à l'option de recyclage $r$ et traité via le routage $p$
$XD_{prc}$	La quantité de produits assignée à l'option de recyclage $r$ , traitée via le routage $p$ , livrée au consommateur $c$
$Y_{f,loc}$	1 si la localisation $loc$ est assignée à l'installation $f$ , 0 autrement

$$\begin{aligned}
Min Z = & \sum_p \sum_r \sum_s CE_{prs} * XE_{prs} + \sum_p \sum_r CP_{pr} * XP_{pr} + \\
& \sum_p \sum_r \sum_c CD_{prc} * XD_{prc} + \sum_f \sum_{loc} CI_{f,loc} * Y_{f,loc}
\end{aligned} \tag{1}$$

Les contraintes:

La contrainte (2) assure que tous les résidus rentrent via les routes d'entrée

$$V_{sr} = \sum_p XE_{prs} \quad (2)$$

La contrainte (3) assure la satisfaction de la demande

$$\sum_p XD_{prc} = D_{cr} \quad (3)$$

Les contraintes (4) et (5) assurent que tous les produits prenant un routage sont évacués de ce routage

$$\sum_p XE_{prs} = XP_{pr} \quad (4)$$

$$XP_{pr} = \sum_c XD_{pcs} \quad (5)$$

La contrainte (6) assure que toutes les installations existantes sur un certain routage pris par un certain produit, sont ouvertes

$$XE_{prs} * M_{rpfloc} \leq Y_{f,loc} * V_{sr} \quad (6)$$

Les contraintes (7) et (8) concernent les natures de variables

$$XE_{prs}, XE_{pr}, XD_{prc} \quad (7)$$

$$Y_{f,loc} = 0, 1 \quad (8)$$

#### 2.2.7.4 Méthode de résolution

Deux scénarios différents en routage et en quantité de produits ont été étudiés. Le modèle a été solutionné à l'aide du logiciel d'optimisation CPLEX

#### 2.2.7.5 Résultats et conclusion

Pour les 2 scénarios :

Les résultats obtenus consistent à la détermination des localisations des installations optimales de désassemblage et de déchiquetage.

Remarques :

Le problème est relativement simple car il n'existe pas de contraintes sur les capacités. De plus, les coûts de traitement sont constants pour tous les centres de traitement.

## **VI) Matériaux de construction**

### **2.2.8 Un réseau à deux niveaux pour le recyclage du sable**

Barros et al. (1998)

La définition du problème de retour pour le recyclage du sable, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section suivante.

#### **2.2.8.1 Définition du problème et objectif visé**

L'objectif est d'optimiser la chaîne de retour du sable considérant les coûts des différents éléments de cette chaîne et déterminer le nombre et la localisation de ses installations ainsi que les capacités de celles-ci. La figure 8 explique le processus de retour du sable.

#### **2.2.8.2 Le modèle**

Le modèle doit incorporer les activités de collecte, de stockage, de nettoyage et de distribution, ainsi que le transport du sable. Il doit de plus tenir compte des coûts fixes de l'ouverture des installations.

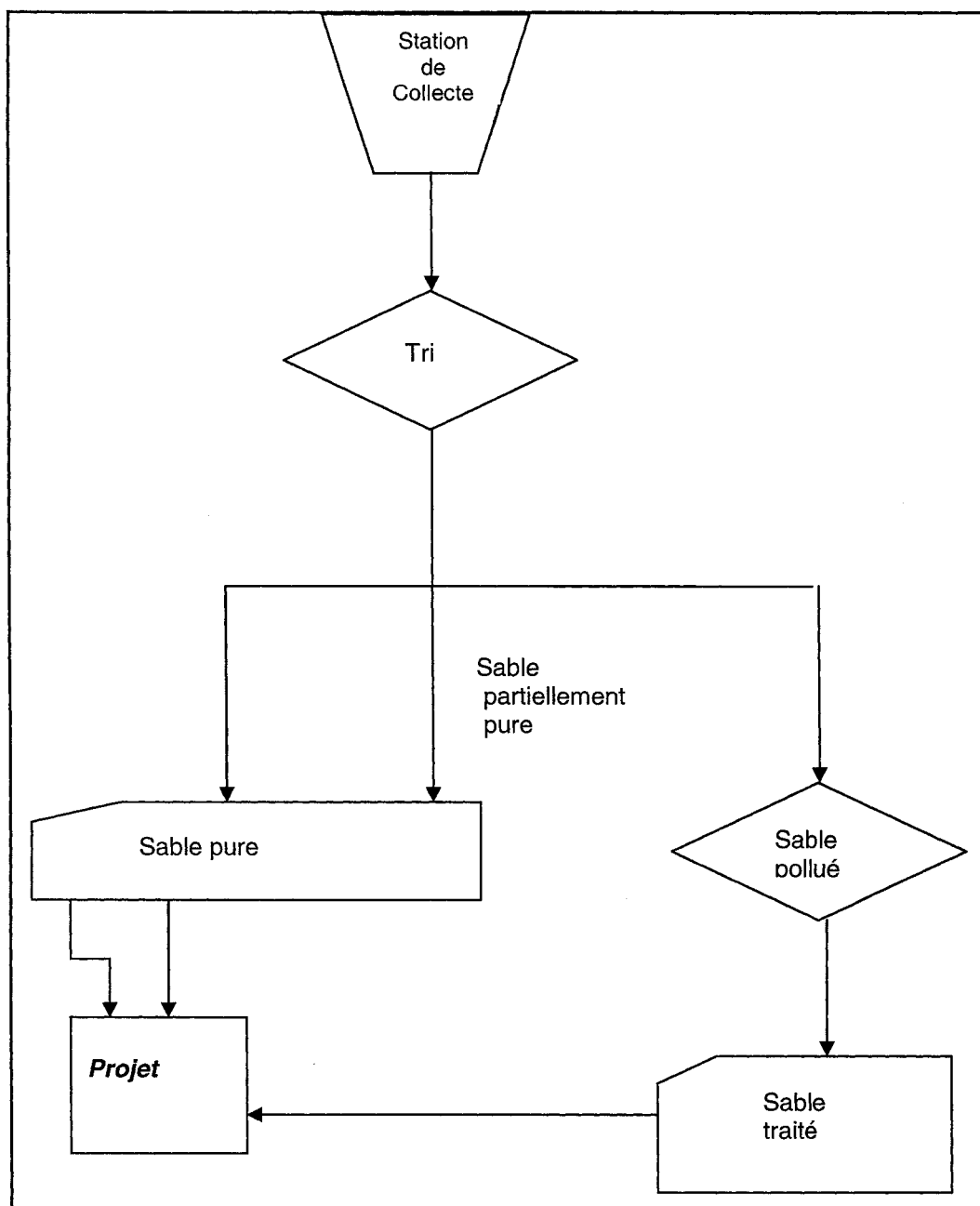


Figure 8: Processus de retour du sable. (Barros et al. 1998)



### 2.2.8.3 La fonction objective

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{j=1}^n f_{jls} y_{jls} + \sum_{k=1}^p g_k z_k + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p b_{jk} v_{jk} + \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^q c_{kl} w_{kl} \\ & + \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^q \sum_{s=1}^2 e_{jls} x_{jls} \end{aligned}$$

(SP)

L'objectif est de minimiser les coûts de transport du sable à travers la chaîne ainsi que les coûts d'ouverture des nouvelles installations.

- m      Nombre de sources du sable
- n      Nombre d'entrepôts régionaux potentiels
- p      Nombre d'installations de traitement potentielles
- q      Nombre de sites de projets
- $t_s$     Pourcentage du sable de type s, où s=1 pour le sable pure, s=2 pour le sable partiellement pure et s=3 pour le sable pollué
- $o_i$     Quantité de sable fourni à la station de tri i
- $d_{ls}$     Demande sur le sable de type s=1, 2 pour le projet l
- $a_{ij}$     La somme des coûts de transport du sable entre la station de tri i et l'entrepôt régional j et les coûts de traitement à cette installation (par tonne)
- $b_{jk}$     Somme des coûts de transport du sable trié entre le dépôt régional j et l'installation de traitement k et les coûts de traitement à cette installation
- $c_{kl}$     Coûts de transport du sable pure entre la station de traitement k et le projet l (par tonne)
- $e_{jls}$     Coûts de transport du sable du type s=1, 2 entre le dépôt régional j et le projet l
- $f_j$     Coûts fixes associés au dépôt régional j (par tonne)
- $H_j$     Capacité maximale de stockage du dépôt régional j
- $g_k$     Coûts fixes associés à la station de traitement k

$$y_j \begin{cases} 1 \text{ si le dépôt régional } j \text{ est ouvert} \\ 0 \text{ autrement} \end{cases}$$

$$z_k \begin{cases} 1 \text{ si l'installation de traitement } k \text{ est ouverte} \\ 0 \text{ autrement} \end{cases}$$

Les contraintes:

$$\sum u_{ij} = o_i, \quad i=1, \dots, m \quad (1)$$

Assure que toute la quantité de sable sortant de la classification est livrée aux entrepôts

$$\sum_{j=1}^n x_{jl1} + \sum_{k=1}^p w_{jkl} = d_{l1}, \quad l=1, \dots, q \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jl2} = d_{l2}, \quad l=1, \dots, q \quad (3)$$

Assure que la demande sur toutes les classes de sable est satisfaite.

$$\sum_{k=1}^p v_{jl} = t_3 \sum_{i=1}^m u_{ij}, \quad j=1, \dots, n \quad (4)$$

Assure que le sable pollué venant des entrepôts est livré aux centres de traitement (nettoyage).

$$\sum_{l=1}^q x_{jls} \leq t_s \sum_{i=1}^m u_{ij}, \quad j=1, \dots, n; \quad s=1, 2 \quad (5)$$

Assure que la quantité de sable sortant des entrepôts n'est pas supérieure à la quantité entrante de la même classe de sable.

$$\sum_{l=1}^q w_{kl} \leq \sum_{j=1}^n v_{jk}, \quad k=1, \dots, p; \quad (6)$$

Assure que la quantité de sable sortant des centres de traitement n'est pas supérieure à la quantité entrante pour la même classe de sable

$$(1-t_3) \sum_{l=1}^q u_{lj} \leq H_j y_j, \quad j=1, \dots, n \quad (7)$$

Assure que la capacité de stockage n'est pas dépassée

$$\sum_{j=1}^n v_{jk} \leq R_k z_k, \quad k=1, \dots, p \quad (8)$$

Assure que la capacité des centres de traitement n'est pas dépassée

#### 2.2.8.4 Méthode de résolution

Il s'agit dans un premier temps d'utiliser des heuristiques. Ensuite les solutions obtenues sont évaluées avec la relaxation linéaire. Les outils informatiques utilisés sont Excel et Gams.

#### 2.2.8.5 Résultats et conclusions

La recherche a abouti à la détermination du nombre d'entrepôts et la localisation des centres de traitement.

### 2.2.9 Système de recyclage des résidus de construction dans la vallée supérieure du Rhine

Spengler et al. (1997 a)

La définition du problème de retour des matières résiduelles de construction, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section suivante.

### 2.2.9.1 Définition du problème et objectif visé

L'objectif de la recherche est d'optimiser le système de recyclage des produits de démolition et de démantèlement des constructions en respectant les lois environnementales. La figure 9 montre ce système de recyclage.

### 2.2.9.2 Le modèle

Le modèle prend en considération les options de réutilisation, les quantités déjà démantelées et la succession des activités de démantèlement.

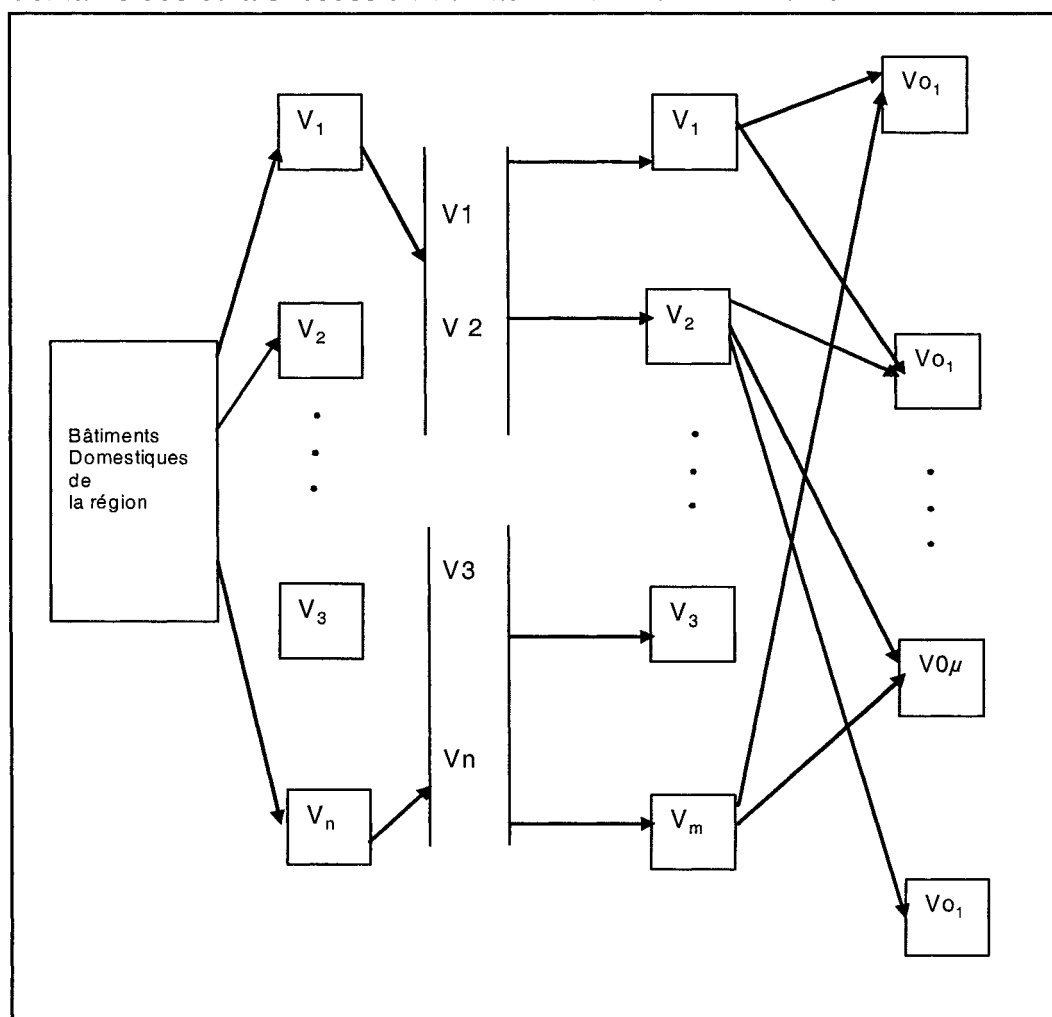


Figure 9: Problème de retour des matériaux de construction (Spengler et al. 1997)

La fonction objective et les contraintes

- i      Indice pour les différentes composantes de bâtiments (i= 1,..., m)
- j      Indice pour les différentes activités de démantèlement (j=1,...,n)
- $\mu$     Indice pour les différentes options de réutilisation ( $\mu=1,..., r$ )
- $C_{i\mu}^v$  Composantes de démantèlement i recyclés en utilisant l'option d  
réutilisation  $\mu$
- $C_j^z$  Coûts de démantèlement de l'activité  $v_j$
- $Y_i^a$  Nombre de composantes de bâtiments déjà démantelés i
- $v_{ij}$  Nombre de composantes de bâtiments i provenant de l'activité  $v_j$
- $\gamma_i$  Quantité de composantes de bâtiments i en tonnes
- $Q_\mu$  Limite de capacité pour l'option de réutilisation  $\mu$
- $X_j$  Variable entière correspondante au nombre d'application de  
démantèlement
- $y_i$  Variable correspondante au nombre de composantes de bâtiments déjà  
démantelés i
- $Z_{i\mu}$  Variable correspondante à la quantité [t] de composantes de bâtiments i,  
recyclée en utilisant l'option de réutilisation  $\mu$

$$(2.8) \quad \left. \begin{aligned} & \text{Max}_{x_j \in N_0} \left( - \sum C_j^z x_j + \text{Max} \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{\mu \in T_i} C_{i\mu}^r Z_{i\mu} \mid \sum Z_{i\mu} = \gamma_i (y_i^a + \sum x_j v_{ij}), \sum_{i \in I_\mu} Z_{i\mu} \leq Q_\mu, Z_{i\mu} \geq 0, \forall i = 1, \dots, m, \mu \in T_i \right\} \right) \end{aligned} \right\}$$

Problème dual

$$\text{Min} \sum_{i=1} \gamma_i (y_i^a + \sum x_j v_{ij}) u_j + \sum Q_\mu \pi_\mu \quad (2.9)$$

Contraintes

$$u_i + \pi_\mu \geq C_{i\mu}^v \quad i=1, \dots, m, \mu \in T_j \quad (2.10)$$

$$\pi_{\mu} \geq 0 \quad \mu=1, \dots, r \quad (2.11)$$

$$u_i \in IR \quad i=1, \dots, m \quad (2.12)$$

$\pi_{\mu}$  : La variable duale de la contrainte de capacité

$u_i$  : La variable duale des contraintes de démantèlement

L'équation 2.10 assure que la quantité de composants démolis ne dépasse pas les capacités de démantèlement.

### 2.2.9.3 Méthode de résolution

Il s'agit de l'utilisation de l'outil d'optimisation Lindo.

### 2.2.9.4 Résultats et conclusion

La réduction des coûts de traitement de 20% par rapport aux résultats obtenus par la méthode conventionnelle.

## 2.2.10 Système de recyclage du fer et de l'acier

Spengler et al. (1997 b)

La définition du problème de retour de l'acier, ainsi que le modèle et ses résultats seront présentés dans la section suivante.

### 2.2.10.1 Définition du problème et objectif visé

Les auteurs ont comme objectif de déterminer les processus à assigner à chacun des sous-produits. De même, il s'agit de déterminer les capacités des installations, la localisation des processus et les sous-produits à expédier à chacune des installations.

### 2.2.10.2 Le Modèle

Le modèle doit atteindre les objectifs mentionnés en minimisant les coûts de transport, les coûts des processus et les coûts de transport entre les processus, en tenant compte des bénéfices.

$x_{qirv}$	Flux de résidu du type $r$ , provenant de l'installation $q$ et transporté vers l'usine de recyclage $i$ en utilisant le processus $v$
$x_{ivr\mu}$	Quantité de résidu de type $r$ recyclée en utilisant le processus $v$ à la localisation $i$ ayant une capacité $\mu$
$x_{isv\mu}$	Quantité de flux de produit $p$ , provenant de l'installation $i$ recyclée en utilisant le processus $v$ et transporté au marché $s$
$x_{jkw\mu}$	Quantité de flux de produit $p$ , provenant de la localisation $j$ et $w$ et transporté vers la localisation $k$ et traité en utilisant le processus $z$
$y_{iv\mu}$	Variable binaire indiquant si le processus $v$ ayant une capacité $\mu$ sera installé
$a_{qr}$	Quantité de résidu du type $r$
$b_{tsp}$	Capacité du bloc récepteur $s$ du type $t$
$f_{iv\mu}$	Coûts fixes associés au processus $v$ ayant une capacité $\mu$
$K_{qi}, k_{jk}$	Coûts de transport spécifiques
$k_{ispt}$	Coûts de transport et d'utilisation
$k_{ir_{v\mu}}$	Coûts variables correspondant au processus $v$ ayant une capacité $\mu$ , à la localisation $i$ pour le type de résidu $r$
$\alpha_{pv\mu}$	Paramètre pour influencer $p$ , $\alpha_{pv\mu} \in \mathbb{R}$
$\beta_{vrr}$	Paramètre pour influencer $r$ , $\beta_{vrr} \in \mathbb{R}$
$\gamma_{iv\mu}$	Paramètre pour montrer que la capacité est diminuée dépendamment de $i, v, r$ et $\mu$
$\mu$	Capacité des installations

### 2.2.10.3 La fonction Objective

$$MinZ = \sum_{j \in I} \sum_{k \in I} \sum_{w \in V} \sum_{p \in R_w} \sum_{z \in V} (k_{jk} x_{jkw pz})$$

(coûts de transport et de l'utilisation et les revenus)

$$\sum_{j \in I} \sum_{k \in S} \sum_{w \in V} \sum_{p \in P} \sum_{i \in st} (k_{ispt} x_{isptv})$$

+(coûts de transport)

$$\sum_{q \in Q} \sum_{i \in I} (K_{qi} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} x_{qirv})$$

$$+ \sum_{i \in I} \sum_{v \in V} \sum_{\mu=1} (f_{iu\mu} y_{iu\mu} + \sum_{r \in R} K_{iru\mu} x_{iru\mu}) \quad (3.1)$$

Contraintes:

$$\sum_{i \in I} \sum_{v \in V} x_{qirv} - a_{qr} = 0, \forall q \in Q, r \in R \quad (3.2)$$

Assure que les résidus provenant de chacune des sources q, sont transportés à une installation i et traités en utilisant le processus v.

$$-\sum_{i \in I} x_{qirv} - \sum_{j \in I} \sum_{w \in V_{jp}^z} x_{ikwpz} + \sum_{\mu=1}^{\mu} x_{ivr\mu} = 0$$

$$\forall i, k \in I, r \in R_v, v, z \in V_i$$

$$\text{or } p=r, k=i, v=z \quad (3.3)$$

$$-\sum_{r \in R} \sum_{w \in V_{jp}^z}^{\mu_v} \alpha_{rvp} x_{irv\mu} + \sum_{k \in I} \sum_{z \in V_{kp}}^{\mu} x_{ijkwpz} + \sum_{s \in S_p} \sum_{i \in ST_p^z}^{\mu_v} x_{isvpt} = 0$$

$$\forall v \in V, i \in I, p \in P_n$$

$$\text{or } : i=j, v=w \quad (3.4)$$

Représente la relation entrée / sortie entre chaque processus, pour chaque produit.



$$x_{ivfr\mu} - \beta_{vrr'} x_{ivr'\mu} \geq 0$$

$$\forall i \in I, v \in V, r \in R_v, r' \in R_{v'} \setminus \{r\}, \mu = 1, \dots, \mu_{iv} \quad (3.5)$$

Relation sommaire entre les types de résidus  $r, r'$ .

$$\sum_{i \in I} \sum_{v \in V_{jp}^z} x_{isvpt} + b_{stp} \geq 0$$

$$\forall s \in S, p \in P, t \in ST_{sp} \quad (3.6)$$

Restreint l'utilisation des options de réutilisation.

$$\sum_{\mu=1}^{\mu_{iv}} y_{iv\mu} \leq n$$

$$\text{or : } y_{iv\mu} \in \{0, \dots, m\}, \forall i \in I, v \in V_i \quad (3.7)$$

Limite la réalisation d'un processus à une certaine installation.

#### 2.2.10.4 Méthode de résolution

L'utilisation d'un outil de résolution : GAMS/OSL

#### 2.2.10.5 Conclusion et résultats

Le résultat est l'assignation des processus, des quantités et des techniques de traitement, aux sites potentiels prédéfinis.

### VII) Déchets solides

#### 2.2.11 La gestion du système de récupération des déchets solides urbains Caruso et al. 1992

La définition du problème de retour des matières résiduelles solides, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section suivante.

### 2.2.11.1 Définition du problème et objectif visé

L'objectif de développer un modèle d'allocation des installations afin de planifier et de gérer un système de traitement des résidus solides urbains en prenant en considération l'impact environnemental et les circonstances géographiques.

### 2.2.11.2 Le modèle

Le modèle comprend les composantes économiques (transport, investissement et gestion), environnementale et la perte en ressources.

### 2.2.11.3 La fonction objective et les contraintes

$i$	Indique la localisation des utilisateurs des services
$j$	Indique les localisations des usines de traitement
$k$	Indique les localisations des sites d'enfouissement
$h$	Indique la technique de traitement
$x_{ij}^h$	Quantité de résidu transportée entre la localisation $i$ et l'usine $j$ et traité en utilisant la technique $h$
$Y_{jk}^h$	Quantité de résidu directement transportée entre la localisation $j$ et le site $k$ , traitée en utilisant la technique $h$
$S_{jk}$	Quantité de résidu transportée entre la localisation $j$ et le site $k$ directement
$Z_j^h$	Booléen indiquant la présence de l'utilisation de la technique $h$ à la localisation $k$
$v_k$	Booléen indiquant la présence d'un site d'enfouissement à la localisation $k$
$r_j^h$	Quantité de résidu traitée à l'installation $j$ en utilisant la technique $h$
$t_k$	Quantité de résidu envoyé au site d'enfouissement à la localisation $k$
$d_i$	Demande correspondante à l'utilisateur situé à la localisation $i$
$c_{ab}$	Coûts de transport entre les localisations $a$ et $b$
$\rho^h$	Proportion de résidu traité en utilisant la technique $h$

$Q_j^h$	Capacité maximale de l'usine située à la localisation j
$Q_k$	Capacité maximale du site d'enfouissement k
$\gamma^h, \delta^h$	Coûts unitaires fixes et variables associés à l'usine utilisant la technique h
$\bar{\gamma}, \bar{\delta}$	Coûts unitaires fixes et variables associés aux sites d'enfouissement
$\eta_j^h, \mu_j^h$	Coûts unitaires fixes et variables correspondant à l'impact environnemental, associés à l'usine situés à l'installation j qui utilise la technique h
$\eta_k, \mu_k$	Coûts unitaires fixes et variables correspondant à l'impact environnemental, associés aux sites d'enfouissement situés à la localisation k

$$F_1 = \left[ \sum_h \sum_j (\delta^h Z_j + \gamma^h r_j^h) + \sum_k (\bar{\delta} v_k + \bar{\gamma} t_k) \right] + \left[ \sum_h \sum_i \sum_j (c_{ik} s_{ik}) + \sum_h \sum_j \sum_k (c_{ij} + y_{jk}^h) \right]$$

$$F_2 = \sum_k t_k$$

$$F_3 = \sum_h \sum_j (\eta_j^h + Z_j^h + \mu_j^h r_j^h) + \sum_k (\eta_k v_k + \mu_k t_k)$$

$$| F_1 |$$

$$F = | F_2 |$$

$$| F_3 |$$

(1)

La fonction objective est constituée de trois composantes :

La composante  $F_1$  représente la partie économique de la fonction et elle implique les coûts fixes, les coûts de transport et les coûts de traitement.

La composante  $F_2$  concerne le taux de perte en matériaux résidus.

La composante  $F_3$  formule l'impact environnemental du système.

Les contraintes

$$\sum_h \sum_j x_{ij}^h + \sum_k s_{ik} = d, i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$r_j^h \leq Q_j^h Z_j^h, j = 1, \dots, n; h = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$t_k \leq Q_k v_k, k = 1, \dots, n; h = 1, 2, 3, \quad (4)$$

$$\sum_i \rho_i^h x_{ij}^h = \sum_k y_{jk}^h; j = 1, \dots, n; h = 1, 2, 3, \quad (5)$$

$$\sum_h Z_j^h \leq 1; j = 1, \dots, n. \quad (6)$$

La contrainte (2) est pour assurer qu'on se débarrasse de tous les résidus produits.

La contrainte (3) concerne la capacité des centres de traitement.

La contrainte (4) concerne la capacité des sites d'enfouissement sanitaires.

La contrainte (5) assure que tout le matériel résidu provenant des centres de traitement soit dirigé vers les sites d'enfouissement sanitaires.

La contrainte (6) empêche d'avoir plus d'un seul centre de traitement à chaque nœud.

#### 2.2.11.4 Méthode de résolution

Plusieurs algorithmes sont présentés. La solution finale est obtenue par la méthode de points de référence. Un exemple numérique est ensuite présenté. Trois scénarios différents ont été examinés et une simulation a été effectuée.

#### 2.2.11.5 Résultats et conclusion

Le nombre jugé convenable de centres de traitement et de sites d'enfouissement sanitaires est respectivement entre (15 et 20) et (10 et 12). De même, la localisation de ces installations, a été obtenue.

#### 2.2.11.6 Remarques :

Le modèle donne un exemple intéressant sur l'interaction de plusieurs facteurs entrants dans la chaîne du traitement des résidus. Ceci est démontré dans la décomposition de la fonction objective.

## VIII) Recyclage des tapis

### 2.2.12 Modèle de localisation des installations pour la réutilisation des résidus des tapis (PFV)

Louwers et al. (1999)

La définition du problème de retour des tapis au Pays-Bas, ainsi que le modèle et ses résultats sont présentés dans la section ci-après.

#### 2.2.12.1 Définition du problème et objectif visé

Étant donné l'augmentation de la quantité de résidu de tapis en Europe, il est nécessaire de développer un modèle d'optimisation du système de recyclage des tapis. Ce modèle aide à déterminer les localisation des installations sans aucune restriction sur l'emplacement géographique de ces installations. Ensuite, le passe aux centres régionaux de prétraitement (RPC), puis aux centres de traitement et finalement, aux clients (utilisateurs) ou bien aux points d'évacuation.

#### 2.2.12.2 Le modèle

Le modèle inclue les paramètres suivants : la quantité du matériel résiduel transporté annuellement à partir de la source préliminaire  $s$  jusqu'à la fin du réseau, les coûts associés au transport, les quantités de matériel entreposé au centres RPC  $r$  et les quantités maximales de matériaux résiduels que les clients avaient décidé de vendre ainsi que les coûts annuels du prétraitement.

Les variables de décision

$C_r$	La quantité du matériel résiduel à être prétraité aux RPC $r$
$N_r$	Le nombre total de RPC compris dans le réseau
$X_r, Y_r$	les coordonnées des RPC
$Q_{sr}$	La quantité de matériel transporté entre les sources $s$ et les RPC $r$
$N_s$	Le nombre total des sources $s$ dans le réseau
$Q_{rcm}$	La quantité du matériel $m$ qui doit être fournie au client $c$ à partir du RPC $r$

$N_c$	Le nombre de clients c ou de points d'évacuation
$N_m$	Le nombre de différents matériaux m circulant dans le réseau
$cat_{sr}$	Les coûts actuels de transport d'une tonne de résidu d'une source s vers un RPC , en Km
$D_{sr}$	La distance entre une source s et un RPC r, en Km

### 2.2.12.3 La fonction objective

L'organisation responsable de la collecte et du traitement des résidus de tapis en Europe a comme objectif de minimiser les coûts totaux reliés au réseau, donc de minimiser :

$$\sum_{s=1}^{Ns} CB_s + \sum_{s=1}^{Ns} \sum_{r=1}^{Nr} CT_{sr} + \sum_{s=1}^{Ns} \sum_{r=1}^{Nr} CS_{sr} + \sum_{s=1}^{Ns} \sum_{r=1}^{Nr} CP_{sr} + \sum_{s=1}^{Ns} \sum_{r=1}^{Nr} \sum_{m=1}^{Nm} CS_{rem} + \sum_{r=1}^{Nr} \sum_{c=1}^{Nc} \sum_{m=1}^{Nm} CT_{rcm} + \sum_{r=1}^{Nr} \sum_{c=1}^{Nc} \sum_{m=1}^{Nm} CD_{rcm}$$

(1)

La composante concernant le transport entre les sources et les RPC est la suivante :

$$CT_{sr} = CL_{sr} + CAT_{sr} + CU_{sr} + LIT_{sr}$$

avec :

$$CL_{rs} = Q_{sr} * C_{lsr} ;$$

$$CAT_{sr} = Q_{sr} * D_{sr} ;$$

$CAT_{sr}$  étant les coûts de transport pour une tonne de matériel de recyclage, entre une source et un RPC

$$CAT_{sr} = Q_{sr} * cat_{sr} * D_{sr}$$

$$D_{sr} = ((X_s^2 - X_r^2) + (Y_s^2 - Y_r^2))^{1/2}$$

Les contraintes

Contraintes de conservation de masse

$$\sum_{s=1}^{N_s} P_{sm} * Q_{sr} = \sum_{c=1}^{N_c} Q_{rcm} ; \quad \text{pour } r=1, \dots, N_r; m=1, \dots, N_m \quad (2)$$

Restriction sur la fourniture

$$\sum_{s=1}^{N_s} Q_{sr} = A_s ; \quad \text{pour } s=1, \dots, N_s \quad (3)$$

Restriction de traitement

$$\sum_{s=1}^{N_s} Q_{sr} = C_r ; \quad \text{pour } r=1, \dots, N_r \quad (3)$$

Obligation de traiter tout le résidu collecté

$$\sum_{s=1}^{N_s} C_r = \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{r=1}^{N_r} Q_{sr} \quad (4)$$

Restriction sur la demande et la disposition

$$\sum_{r=1}^N Q_{rcm} = D_{cm} \quad \text{pour } c=1, \dots, N_c; m=1, \dots, N_m \quad (5)$$

Pour assurer la possibilité de se débarrasser de tout le résidu collecté et de distribuer le matériel sur lequel il existe des clients.

#### 2.2.12.4 Méthode de résolution

A partir des prévisions des quantités de matériaux devant être prétraitées et les trois capacités possibles qui ont été calculées, le nombre initial des RPC à capacité maximale est calculé. En fonction des localisations des RPC et des quantités fournies, les coûts associés sont calculés par la fonction objective. Ce processus est répété avec toutes les combinaisons possibles jusqu'à atteindre l'optimalité. Pour ce faire, le modèle a été programmé en FORTRAN 90, tout en utilisant une interface MS Excel pour les entrées et les sorties des données.

#### **2.2.12.5 Conclusion et résultats**

Le résultat de la recherche est la détermination du nombre optimal d'installations. De même la localisation de ces installations a été effectuée. Il s'agit de quatre installations optimales en Allemagne.

#### **2.2.12.6 Commentaires**

Le degré de liberté de choix des localisations des installations est souvent inférieur au cas de l'étude de Louwers et al. (1999).

### **2.2.13 Modèle théorique (Heuristique de concentration)**

Rosing et ReVelle (1995)

Le modèle théorique et ses résultats seront présentés dans la section suivante.

#### **2.2.13.1 Définition du problème et objectif visé**

L'objectif est de présenter un heuristique de concentration utilisable dans les problèmes de localisation des installations d'un réseau et d'optimisation.

#### **2.2.13.2 Le modèle**

Le modèle subdivise les nœuds (éléments) du réseau en plusieurs groupes (concentration sets), parmi lesquels un groupe comprenant les installations qui apparaissent dans toutes les solutions examinées et un autre comprenant celles qui figurent au moins dans une des solutions.

#### **2.2.13.3 La fonction objective**

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1} \sum_{j=1} a_i d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$i$  : nœuds de commande ;  $j$  : installations potentielles

$a_i$  : poids associé au nœud ;  $d_{ij}$  : distance entre  $i$  et  $j$



**2.2.13.4 Méthode de résolution**

La méthode de solution consiste à l'application de l'heuristique de concentration pour un nombre de 200.

**2.2.13.5 Outil informatique de résolution**

L'outil utilisé est le logiciel CPLEX.

**2.2.13.6 Résultats et conclusion**

La conclusion est la détermination des localisations optimales.

## **Chapitre 3**

### **Classifications**

Cette section comprend les classifications des modèles de logistique inverse, en catégories jugées pertinentes, du point de vue de cette recherche. Les modèles sont classifiés en 10 catégories qui sont les suivantes:

1) Les contraintes, 2) L'industrie, 3) L'outil de résolution, 4) La technique de solution, 5) Le type de modèle, 6) L'objectif du modèle, 7) La composante de la fonction objective, 8) Les besoins (raisons) de retour, 9) Les activités de logistique inverse, 10) Le type de sélection des localisations.

#### **3.1 Classification par type de contraintes**

En général, les contraintes utilisées dans les modèles d'optimisation de systèmes de logistique inverse, servent, à contrôler le réseau de retour et à l'acheminement des entités à travers le réseau. D'autre part, ces contraintes aident à réaliser les objectifs derrière l'implantation du réseau et à assurer le respect des règlements et des législations imposées à l'entreprise.

Les contraintes les plus utilisées ont comme facteur commun la conservation de flux ou de masse à travers le réseau. De même, le respect de la capacité des installations et la suffisance des ressources sont souvent assurés et contrôlés par les contraintes.

Dans cette section, la classification des modèles mathématiques étudiés sera présentée. Le tableau 1 montre la classification des modèles selon les contraintes.

Tableau 1: Classification des modèles par type de contraintes

Types de cont. Auteurs	Conservation de flux/masse	Contrôle, Restriction/ nombres des installations	Limites inf/sup. des facilités et sites	Capacité	Restriction sur l'expédition (Quantité)	Contrôle de routages/ limitation sur destinations	Satisfaction de la demande/ offre satisfaisante	Restriction sur les processus
Li-Hsing Shih et al. (2000)	X	X	X	X	X	X		
Lee kroon & Gaby Vrijens	X					X		
H.R.Kirkke, et al. (1998)	X	X					X	X
Jayaraman et al. (2001)	X		X	X	X	X		
Louwers et al. (1999)	X			X	X			
Tung-Lai Hu et al. (2002)	X			X*				
Krikke et al. (1999)	X						X	
Barros et al. (1998)	X			X			X	
Spengler et al. (1997) a	X			X				
Spengler et al. (1997) b	X			X				X
Caruso et al. (1993)	X			X			X	X
Zografos et Samara (1990)	X	X		X				

(\*) Les limites prédéfinies sur le traitement sont considérées autant que les limites sur la capacité

### **3.2 Classification par type d'industrie (ou produit)**

Les produits de retour sont très variés et ne sont pas restreints à un seul type d'industrie. De même, certains des modèles étudiés peuvent être applicables à plusieurs types d'industries comme le modèle de Jayaraman et al. (2001). Le tableau 2 montre la classification des modèles selon le type d'industrie.

Tableau 2: Classification par type d'industrie (ou produit)

Industries Auteurs	Appareils électriques	Conteneurs	Photo- copieuses	Matières dangereues	Produits en fin de vie	Matériaux de construction	Matières résiduelles/ ordures ménagères	Théo- rique
Li-Hsing Shih et al. (2000)	X				X			
Lee kroon & Gaby Vrijens		X						
H.R.Kirkke, et al. (1998)			X		X			
Jayaraman et al. (2001)				X				
Louwers et al. (1999)					X			
Tung-Lai Hu et al. (2002)				X				
Krikke et al. (1999)					X			
Barros et al. (1998)						X		
Spengler et al. (1997) a						X		
Spengler et al. (1997) b						X		
Caruso et al. (1993)							X	
Zografos et Samara (1990)					X			
Rosing et Velle (1996)								X

### 3.3 Classification par outil de solution

Cette classification a pour but de déterminer l'outil d'optimisation le plus utilisé pour optimiser les systèmes de logistique inverse. Il est facile de conclure que le logiciel LINDO est un des plus répandus parmi les outils d'optimisation des systèmes de logistique inverse. D'autres auteurs développent leurs propres outils d'optimisation (Caruso et al. 1993). La classification des modèles par outil de résolution est présentée au tableau 3.

Tableau 3: Classification par outil de solution

Modèles	Outil de résolution
H.R.Kirkke, et al. (1998)	LINDO
Jayarman et al. (2001)	Solveur : CPLEX
Louwers et al. (1999)	Programmation en FORTRAN 90/interface I/O : Excel
Tung-Lai Hu et al. (2002)	LINDO
Krikke et al. (1998)	CPLEX
Barros et al. (1998)	Excel et Gams
Spengler et al. (1997) a	LINDO
Spengler et al. (1997) b	GAMS/OSL
Caruso et al. (1993)	PURPLE
Zografos et Samara (1990)	UNIVAC/FMPS
Rosing et Velle (1996)	CPLEX

### 3.4 Classification par technique de résolution

Afin de connaître les techniques de recherche opérationnelle utilisées en optimisation de systèmes de logistique inverse, les modèles ont été classifiés selon les techniques de solution utilisées. Cette classification est montrée au tableau 4. Les heuristiques sont les techniques de résolution les plus utilisées pour ce genre de problèmes, prenant en considération la complexité des systèmes utilisés par Rosing et Velle (1996) et Barros et al. (1998).

Tableau 4: Classification par technique de solution

Modèle	Technique de solution
Lee Kroon & Gaby Vrijens (1995)	Dual-based procedure for uncapacitated facility location, d'Erlenkotter (1993)
Jayarman et al. (2001)	Le heuristique de concentration est celui de Rosing et ReVelle
Louwers et al (1999)	Algorithmes numériques (NAG Fortran Library)
Barros et al. (1998)	Heuristiques
Caruso et al. (1993)	Reference Point Method
Zografos et Samara (1990)	Transportation Network
Rosing et Velle (1996)	Heuristique

### 3.5 Classification MILP vs Continu

La majorité des modèles sont des modèles de programmation linéaires mixtes. Ceci est dû à la nature des problèmes qui nécessitent l'utilisation des variables entières et binaires, surtout en ce qui concerne la localisation des installations. Des variables continues sont assignées aux quantités et aux distances etc. La classification selon le type des modèles est présentée par le tableau 5.

Tableau 5: Classification MILP vs Continu

Auteurs	Type de modèle
Li-Hsing Shih et al. (2000)	MILP
Lee Kroon & Gaby Vrijens (1995)	MILP
H.R.Kirkke, et al. (1998)	MILP
Jayarman et al. (2001)	MILP
Louwers et al. (1999)	MILP
Tung-Lai Hu et al. (2002)	Continu en temps discret
Krikke et al. (1999)	MILP
Barros et al. (1998)	MILP
Spengler et al. (1997) a	MILP
Spengler et al. (1997) b	MILP
Caruso et al. (1993)	MILP
Zografos et Samara (1990)	MILP
Rosing et Velle (1996)	MILP

### 3.6 Classification par objectif du modèle

Les objectifs des modèles sont axés sur la minimisation des coûts des opérations du réseau de logistique inverse (collecte, traitement, transport, etc...) et la détermination du nombre des installations et leurs localisations optimales. Certains modèles peuvent servir à mesurer l'impact des décisions du management de l'entreprise (.Kirkke, et al. 1998). Le tableau 6 contient la classification par type de modèle.



Tableau 6: Classification par objectif du modèle

Modèle	Objectif
Li-Hsing Shih et al. (2000)	Maximiser les revenus du système de recyclage des appareils électroménagers à Taiwan
Lee kroon & Gaby Vrijens (1995)	Déterminer la localisation et le nombre des entrepôts des conteneurs ainsi que les frais des services, de distribution et de collection dans le système de logistique inverse de conteneurs de retour
H.R.Kirkke, et al. (1998) a	Étudier l'effet de la séparation de certaines activités (le réassemblage et la préparation) du processus de récupération des photocopieuses originellement au Pays Bas, à des installations en République Tchèque
Jayarman et al. (2001)	Formuler un système large de logistique inverse complexe, à large nombre d'installations
Louwers et al. (1999)	Construire un modèle qui sert à l'allocation libre des installations de collecte, de prétraitement et de redistribution des résidus des tapisseries, en tenant compte des coûts de dépréciation
Tung-Lai Hu et al. (2002)	Déterminer le routage et la localisation des installations d'un système de transport des résidus dangereux
Krikke et al. (1999) b	Concevoir et optimiser le réseau de retour des produits dans l'industrie de fabrication des automobile ainsi que la localisation des installations et le routage
Barros et al. (1998)	Optimiser la chaîne de retour du sable considérant les coûts des différents éléments et déterminer le nombre et la localisation de ses installations ainsi que les capacités de celles-ci
Spengler et al. (1997) a	Optimiser le système de recyclage des produits de démolition et de démantèlement des constructions en respectant les lois environnementales
Spengler et al. (1997) b	Développer un processus pour chaque sous-produit, déterminer les capacités, la localisation des processus et déterminer les sous-produits à expédier à chaque installation
Caruso et al. (1993)	Développer un modèle d'allocation des installations pour planifier et gérer un système de traitement des résidus solides urbains. Ce système prend en considération l'impact environnemental et les circonstances géographiques
Zografos et Samara (1999)	Déterminer le routage et la localisation des installations d'un système de transport des résidus dangereux

### **3.7 Classification par composante de la fonction objective versus les résultats du modèle**

Cette classification a pour but de distinguer les composantes essentielles de la fonction objective, afin d'optimiser un système de logistique inverse. Les résultats de chaque modèle, sont montrés dans la colonne adjacente à la colonne des composantes de la fonction objective du tableau 7. Ainsi, il est à constater que l'influence de chacune des composantes de la fonction objective sur les résultats et les conclusions du modèle. La classification est montrée au tableau 7.

Tableau 7: Classification par composante de la fonction objective versus les résultats du modèle

Modèles	Composantes de la fonction objective	Résultats
Li-Hsing Shih et al. (2000)	La maximisation des revenus et des subventions et la minimisation des coûts de traitement, de transport, de fonctionnement et les coûts fixes	La détermination des centres de collecte et de recyclage optimaux
Lee kroon & Gaby Vrijens (1995)	La minimisation des coûts totaux de fonctionnement, de transport et des coûts fixes	La détermination du nombre des installations et leurs localisations
H.R.Kirkke, et al. (1998)	La minimisation des coûts de traitement, de transport et de maintien d'inventaire	La détermination que la solution économique est d'effectuer les 2 processus dans une seule installation au lieu d'être effectués séparés
Jayarman et al. (2001)	La minimisation des coûts de transport, l'ouverture des sites et la remise en état	La détermination du nombre optimal des installations de collecte et de remise en état
Louwers et al. (1999)	La minimisation des coûts de transport, de collecte, de retraitement, de disposition, de dépréciation et taux d'intérêt	La détermination du nombre et de la localisation des installations : 4 installations optimales en Allemagne
Tung-Lai Hu et al. (2002)	La minimisation des coûts de collecte, de transport, de traitement et de disposition	La détermination des quantités de collection, de stockage et de traitement à chaque étape
Krikke et al. (1999)	La minimisation des coûts d'approvisionnement, d'investissement, de traitement et de livraison	La détermination des villes (localisation) des installations de désassemblage et de déchiquetage

Tableau 7: Classification par composante de la fonction objective versus les résultats du modèle (Suite)

Modèles	Composantes de la fonction objective	Résultats
Barros et al. (1998)	La minimisation des coûts de transport	Détermination du nombre d'entrepôts et la localisation des centres de traitement
Spengler et al. (1997) a	La minimisation des coûts de démantèlement	La réduction des coûts de traitement de 20% par rapport à la méthode conventionnelle
Spengler et al. (1997) b	La minimisation des coûts de transport et de transport entre les processus, les coûts de traitement et revenus	L'assignation des processus, des quantités et des techniques, aux sites potentiels prédéfinis
Caruso et al. (1993)	La minimisation des coûts d'économies, de la perte en ressources et de l'impact environnemental	La détermination du nombre de centres de traitement et de sites d'enfouissement, ainsi que leurs localisations
Zografos et Samara (1990)	La minimisation des coûts de transport en fonction de la demande	La détermination et la localisation des sites de disposition, des centres de population et le routage par lequel le résidu sera transporté

### **3.8 Classification selon les besoins (raisons) de retour**

#### **La nécessité de retour**

Il existe plusieurs raisons pour lesquelles les produits doivent être retournés à la compagnie manufacturière. Les principales raisons de retour sont discutées ci-dessous:

#### **3.8.1 La remise en état**

Les politiques d'après vente adoptées par les entreprises mènent à un flux croissant de produits de retour pour qu'ils soient remis en état. Ceci peut être spécifié dans le contract signé avec les clients (Krikke et al. 1999).

Une installation spécialisée de remise en état transforme le produit de retour en unités dont la qualité atteint parfois le même niveau que les nouvelles unités (Jayaraman et al. 2001).

#### **3.8.2 La réutilisation**

Le développement d'un réseau de logistique inverse peut être pertinent pour une entreprise qui désire réaliser des économies. La rentrée du produit dans le processus de réutilisation assure au client une valeur qui ne pourrait pas être disponible autrement. Elle impose au détaillant et à la compagnie manufacturière de nouvelles tâches. D'autre part elle réduit la quantité de ressources requises pour la production (Jayaraman et al. 2001).

#### **3.8.3 Recyclage**

Contrairement à la remise en état et à la réutilisation, le recyclage comporte une désintégration complète du matériel du produit de retour. Le recyclage est motivé plutôt par la responsabilité légale et environnementale de l'entreprise envers ses produits. De plus en plus, les entreprises adoptent des stratégies ayant trait aux activités de préservation de l'environnement (Giutini et Andel (1995) et (Jayaraman et al.2001). Les gouvernements en Europe et au Canada ont défini des standards assez élevés, en ce qui concerne le recyclage et la réduction des pertes en

ressources (Haw-Jan et Steven 1994). Ceci a généré un important besoin pour l'implantation des systèmes de logistique inverse, dans les modèles étudiés.

### 3.8.4 Rappel des produits

Afin d'augmenter le niveau de satisfaction de sa clientèle, l'entreprise doit, dans certains cas, rappeler ses produits, créant ainsi un flux de retour considérable (Light 2000). Une classification des modèles étudiés selon les besoins de retour est présentée dans le tableau ci-contre.

Tableau 8: Classification des modèles selon les besoins de retour

Réutilisation	Recyclage	Remise en état	Produit de rappel	MDR*
H.R.Kirkke, et al. (1998)	Li-Hsing Shih (2000)	H.R.Kirkke, et al. (1998)	Jayaraman et al. (2001)	Jayaraman et al. (2001)
Louwers et al. (1999)	Krikke et al. (1998)	Jayaraman et al. (2001)		Zografos et Samara (1990)
Lee kroon & Gaby Vrijens (1995)	Barros et al. (1998)			Tung-Lai Hu et al. (2002)
Krikke et al. (1999)	Spengler et al. (1997) a			
	Spengler et al. (1997) b			
	H.R.Kirkke, et al. (1998)			
	Caruso et al. (1993)			

\* MDR : matières dangereuses résiduelles

### 3.9 Classification selon les activités

Les activités typiques de logistique inverse pourraient être les processus que la compagnie utilise afin de collecter les produits utilisés, endommagés, non désirés (retour pour balancer l'inventaire), les produits obsolètes, ainsi que les matériaux d'emballage et d'expédition, à partir du revendeur ou de l'utilisateur final (Rogers et Tibben-Lembke 1998).

Selon Rogers et Tibben-Lembke (1998), les activités de logistique inverse peuvent être résumées dans le tableau 9.

Tableau 9: Les activités de logistique inverse (Rogers et Tibben-Lembke 1998)

Matériel	Activités de logistique inverse
Produits	Retour au fournisseur Revente Point de vente Marchandise récupérable Reconditionnement Remise en état Réusinage Réclamation du matériel Recyclage Envoi aux sites d'enfouissements
Emballage	Réutilisation Remise en état Réclamation du matériel Recyclage Marchandise récupérable

À travers la lecture des modèles étudiés, il a été important de déduire qu'il est possible d'ajouter à ces activités, la collecte, le désassemblage, le stockage et le transport, comme activités essentielles de logistique inverse. En somme, ces activités serviront à classer les modèles dans le tableau 10 comme suit :

Tableau 10: Classification des modèles selon les activités de retour

Auteurs	Collecte	Trans- port*	Stock- age	Re- cyclage	Remise en état	Ré- utilisation	Ré- usinage	Désassem- blage/Dém antèlement	Re- vente	Envoie aux sites d'enfouisse- ment	M.R.**
Li-Hsing Shih et al. (2000)	X	X	X	X				X		X	X
Lee kroon & Gaby Vrijens	X	X				X					
H.R.Kirkke, et al. (1998)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Jayarman et al. (2001)	X	X			X	X				X	
Louwers et al. (1999)	X	X	X	X		X			X	X	X
Tung-Lai Hu wt al. (2002)	X	X	X			X				X	
Krikke et al. (1999)	X	X		X		X		X	X	X	X
Barros et al. (1998)	X	X	X	X		X					X
Spengler et al. (1997) a				X				X		X	
Spengler et al. (1997) b		X		X				X		X	
Caruso et al. (1993)	X	X		X						X	
Zografos et Samara (1990)		X								X	

(\*) Comprend la distribution et le mouvement physique du matériel de retour à travers le réseau de logistique inverse.

(\*\*) Matériel réclam



### 3.10 Classification selon le degré de liberté de choix des localisations

Certains modèles traitent le problème de sélection des sites et des installations parmi des localisations prédéfinies ou qui existent déjà. Il existe d'autres modèles qui peuvent avoir comme but le choix libre des localisations des installations, ainsi que leurs nombres, ceci crée deux catégories de modèles, qui seront présentées dans la classification suivante.

Tableau 11: Classification des modèles selon le degré de liberté de choix des localisations

Sélection parmi des localisations prédéfinies	Choix libre des localisations
Li-Hsing Shih (2000)	Louwers et al. (1999)
Lee kroon & Gaby Vrijens (1995)	
H.R.Kirkke, et al. (1998)	
Jayarman et al. (2001)	
Tung-Lai Hu et al. (2002)	
Krikke et al. (1999)	
Barros et al. (1998)	
Spengler et al. (1997) a	
Spengler et al. (1997) b	
Zografos et Samara (1990)	
Rosing (1996)	

Cette classification servira comme guide dans les volets suivants de la construction de notre modèle:

- La détermination des paramètres et des variables décisionnelles du modèle
- La formulation
- Les composantes de la fonction objective
- Les méthodes de résolution
- Les outils informatiques de résolution

## **Chapitre 4**

### **Sélection et choix de modèle**

Suite à l'étude des modèles mathématiques de logistique inverse et leurs classifications qui ont été présentés dans les chapitres 2 et 3 de ce document, le modèle jugé le meilleur à répondre aux besoins de notre recherche envisagée est le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000). Plusieurs raisons justifient ce choix :

1. Le modèle peut être facilement adapté à plusieurs types d'industries et aux différents contextes nécessitant l'implantation, la conception et l'optimisation d'un réseau de logistique inverse.
2. Le modèle traite le problème d'optimisation et de la localisation des installations d'un réseau de logistique inverse, ce qui constitue le même objectif de la recherche présente.
3. Les composantes de la fonction objective traitées dans le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000) sont celles du transport, des coûts fixes des centres de traitement, des coûts d'opération, des subventions et des revenus. Ces éléments représentent des composantes principales dans la modélisation d'un problème de logistique inverse. La structure de ce modèle ressemble à la structure du modèle envisagé.
4. La nature du modèle : il s'agit d'un modèle linéaire mixte conçu pour la résolution d'un problème de logistique inverse en choisissant des installations prédéfinies.

5. Les objectifs du modèle : La détermination du nombre optimal des installations de traitement des produits de retour.
6. La structure du réseau étudié dans le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000) ressemble beaucoup à la structure du réseau de retour des matières dangereuses résiduelles (MDR). Cette structure est présentée par la figure 10. Il est à noter que la partie de la collecte et de distribution n'est pas incluse dans le modèle des MDR (matières dangereuses résiduelles) pour des raisons qui seront expliquées dans le chapitre suivant.

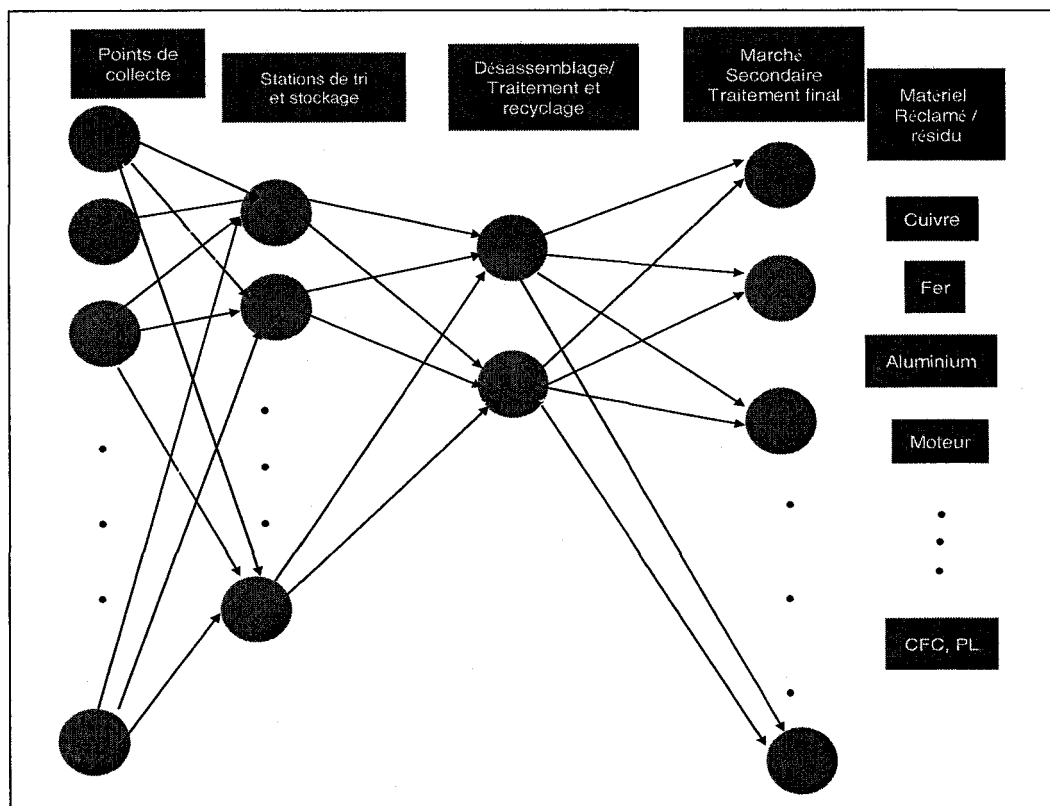


Figure 10: Système de logistique inverse en industrie des appareils électriques à Taiwan, Li-Hsing 2000

Le modèle envisagé sera conçu en tenant compte des facteurs pris en considération dans le modèle précité et en prenant en considération les particularités du cas étudié.

En étudiant le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000), plusieurs éléments nécessaires au cas des MDR sont trouvés. Cela se manifeste par ce qui suit:

l) La fonction objective:

La fonction objective consiste à maximiser les bénéfices et à minimiser les coûts de transport ainsi que les coûts de traitement, contenant cinq composantes. La première concerne les revenus et les coûts de traitement. La deuxième composante tient compte des subventions. La troisième composante concerne les coûts de transport en fonction de la quantité du matériel expédié et les coûts. La quatrième composante tient compte des coûts fixes. Finalement, la cinquième composante tient compte des coûts des opérations.

Voici la fonction objective du modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000):

$$\begin{aligned}
 \text{Max : } & \sum_{g \in B1} B_g * L_g - \sum_{g \in B1} C_g * L_g + [\text{revenue et coûts de traitement}] \\
 & \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} M_{1j} * A_{ij} + \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} M_{3j} * (Y_{spj} + H_{ipj}) - [\text{subvention}] \\
 & \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} (TCIS_j * D_{is} * X_{isj}) - \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} (TCSP_j * D_{sp} * Y_{spj}) - \\
 & \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} (TCIP * D_{ip} * H_{ipj}) - \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} (TCPR_g * D_{pr} * Z_{prg}) \\
 & - [\text{coûts de transport}] \\
 & \sum_{s=n+1}^q f_s * S_s - \sum_{g \in B1} f_p * P_p - \sum_{g \in B1} f_r * R_{rg} - [\text{coûts fixes}] \\
 & \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} CC1_j * A_{ij} - \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} CC2_j * X_{isj} - \\
 & \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} CC3_j * Y_{spj} + \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} \sum_{g \in B1} CC3_j * H_{ipj} [\text{coûts d'opération}]
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Les contraintes:

Le modèle comprend 3 types de contraintes:

– Contraintes de conservation de flux:

$$\sum_s X_{isj} + \sum_p H_{ipj} = A_{ij} \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_i X_{isj} = W_{sj} \quad \forall s, j \quad (3)$$

$$\sum_p Y_{spj} = W_{sj} \quad \forall s, j \quad (4)$$

$$\sum_s Y_{spj} + \sum_i H_{ipj} = V_{pj} \quad \forall p, j \quad (5)$$

$$\sum_j V_{pj} * G_{jg} = \sum_r Z_{prg} \quad \forall p, g \quad (6)$$

$$\sum_p Z_{prg} = U_{rg} \quad \forall r, g \quad (7)$$

$$\sum_p U_{rg} = L_g \quad \forall r, g \quad (8)$$

– Contraintes de capacité:

$$\sum_j W_{sj} \geq \text{MINS} * S_s \quad \forall s \quad (9)$$

$$\sum_j W_{sj} \leq \text{MAXS} * S_s \quad \forall s \quad (10)$$

$$\sum_j W_{sj} = T_s \quad \forall s \quad (11)$$

$$\sum_j V_{pj} \geq \text{MINP} * P_p \quad \forall p \quad (12)$$

$$\sum_j V_{pj} \leq P_p \quad \forall p \quad (13)$$

$$\sum_j V_{pj} = Q_p \quad \forall p \quad (14)$$

$$U_{rg} \geq \text{MINR}_{rg} * R_{rg} \quad \forall r, g \quad (15)$$

$$U_{rg} \leq \text{AXR}_{rg} * R_{rg} \quad \forall r, g \quad (16)$$

Contrainte sur le nombre des installations :

$$\sum_{s=n+1}^q S_s \leq h_1 \quad (17)$$

- Les définitions des variables de ce modèle ont été présentées au chapitre 2
- Les composantes en commun entre le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000) et le modèle d'optimisation du réseau de retour des MDR sont celles des coûts de transport et des coûts fixes.
- Les contraintes qui sont utiles pour le problème de retour des MDR, sont les contraintes de capacité et de la conservation des flux.

Ceci constitue un modèle qui est facilement adaptable au cas de retour des matières dangereuses résiduelles (le problème traité dans cette recherche). Le système de retour des matières dangereuses résiduelles dépend principalement des coûts de transport et des coûts fixes. Pour cela, la deuxième et la cinquième composante seront retenues pour le modèle des MDR.

En outre, les contraintes à respecter dans ce problème sont celles de la capacité, de la conservation de flux et de l'ouverture des centres de traitement. Le modèle présenté dans le chapitre 5 est constitué des équations 1, 2, 3, 4 et 5. Il est construit afin de respecter les contraintes mentionnées ci-dessus et de minimiser les coûts de transport de matières dangereuses résiduelles, ainsi que les coûts fixes. La contrainte numéro 5 n'existe pas dans le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000). Cette contrainte est liée à la nature des variables.

Le tableau 12 présente une comparaison entre le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000) et celui de MDR. En ce qui concerne la fonction objective, les composantes concernant les subventions et les revenus n'existent pas dans le modèle des MDR. De même, la gestion du système de retour des MDR est concernée par la minimisation des coûts associés au retour. D'autre part, les deux modèles incluent des contraintes de capacité et de conservation de flux. Par contre, dans le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000), il existe une limitation sur le nombre des installations.

Tableau 12: Comparaison entre le modèle de Li-Hsing Shih et al. (2000) et celui de MDR

	Li-Hsing Shih et al. (2000).	Modèle de retour des MDR
Composantes de la fonction objective	1-Coûts de Transport 2-Coûts Fixes 3-Coûts des opérations 4-Revenus 5-Subventions	1-Coûts de Transport 2-Coûts Fixes
Contraintes	1-Conservation de flux 2-Capacité 3-Nombre d'installations	1-Capacité 2-Conservation de flux 3-Nombre d'installations

## **Chapitre 5**

### **Le problème d'optimisation du réseau de retour des M D R**

(Cas d'étude de logistique inverse et de localisation)

#### **5.1 Introduction**

Plusieurs études récentes ont été effectuées en égard à l'optimisation des réseaux de transport des Matières Dangereuses Résiduelles (MDR). La spécificité du transport des MDR provient du double intérêt de la minimisation du transport à travers le réseau de logistique inverse. D'une part, la minimisation des distances parcourues entre les installations du réseau, crée une réduction des coûts totaux des opérations du système de logistique inverse, d'autre part, la réduction des distances parcourues par les véhicules transporteurs des MDR, réduit aussi les risques associés au transport de ces matières.



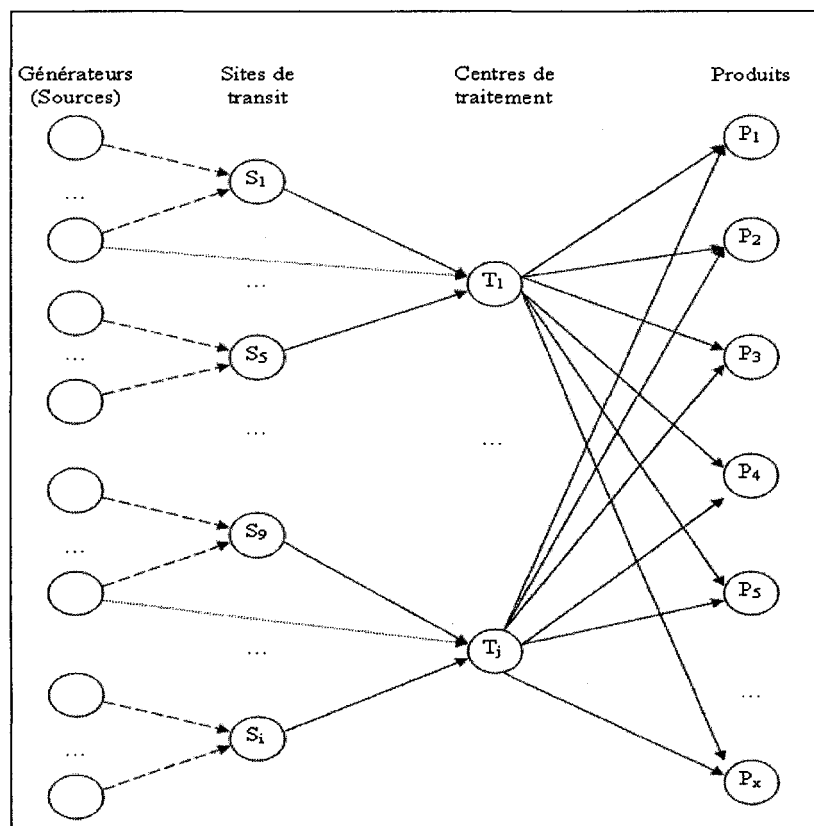


Figure 11: Système de retour des MDR

La figure ci-dessous représente le réseau de logistique de matières dangereuses résiduelles (MDR). Ceci est dans le cadre des activités d'une entreprise qui possède des installations réparties à l'échelle du Québec. Le système de logistique inverse en question, comprend 4 genres de stations:

- 1- Les sources du matériel de retour (générateurs)
- 2- Les sites de transit
- 3- Les centres de traitement
- 4- Les récepteurs

Le système de logistique inverse présenté à la figure 11, se compose de 500 générateurs, 45 sites de transit, quatre centres de traitement de même que des stations de réception (récepteurs).

Les générateurs des MDR se chargent de la livraison vers les centres de transit par conséquence, cette étude ne considérera pas les activités de logistique inverse ayant lieu avant l'arrivée des MDR aux sites de transit et se limitera à la partie du réseau, située entre les stations de transit et les centres de traitement.

Les centres de traitement (CT) sont répartis comme suit :

- 1- CT Saint Jérôme qui couvre la région du Nord Ouest du Québec
- 2- CT Québec qui couvre la région de l'est
- 3- CT Ste Hyacinthe qui couvre la région du centre sud
- 4- CT Montréal

Les sites de transit sont concentrés autour du CT Montréal. Le problème provient de la concentration des sites de transit autour du centre de traitement de Montréal.

Par contre, la capacité de ce centre est la plus petite de l'ensemble des centres de traitement. Il est donc nécessaire de répartir les charges provenant des sites de transit situés autour du CT Montréal, sur les autres centres, et ce, de façon optimale tout en respectant la contrainte de capacité. Ceci devra être réalisé par le modèle d'optimisation.

Le matériel de retour comprend plusieurs types de matières. Le matériel n'est pas acheminé d'une façon optimale, vers les centres de traitement. Afin de faciliter cette tâche, le matériel doit être uniformisé. Pour ce faire, le matériel est placé dans des charges unitaires de même taille. Les entités acheminées entre les sites de transit et les centres de traitement sont donc appelées : charges unitaires (barils ou appareillage) identiques. Après leur arrivée à un point de transit, les charges ne peuvent pas rester plus d'un mois et au plus douze mois au total dans le système avant d'être disposées proprement ou traitées. Il faut donc résoudre le problème de retour dans une période totale d'une année.

## 5.2 Les données

Les données utilisées dans cette étude pour optimiser le réseau de transport des MDR sont celles de l'année 2003. Les quantités mensuelles de retour ont été calculées. La conclusion de l'analyse statistique effectuée (Annexe 2) sur les quantités mensuelles est ce qu'il n'y a aucune différence significative entre les mois. Ainsi, la moyenne des quantités sera utilisée dans la planification du réseau des MDR.

La capacité des installations a été calculée en kg et ensuite transformée en charges unitaires.

Pour les distances entre les installations, une matrice DE-À est construite. Celle-ci comprend les sites de transit et les centres de traitement. Par la suite, les distances sont transformées en temps et une matrice de temps de transport est développée (Annexe 1). Les coûts de transport par unité de distance sont considérés constants entre tous les sites de transit et les CT.

Les coûts fixes considérés pour les centres de récupération des MDR sont les suivants : la refacturation des bâtiments, le matériel de transport, l'amortissement et les taxes foncières associées aux bâtisses. La répartition des coûts entre les CT est celle fournie par la compagnie. Les seuls frais variables considérés par le modèle sont les coûts de transport.

Le transport des Matières dangereuses résiduelles se fait par des camions remorque. La capacité de chaque camion est de 48 charges unitaires. La capacité des sites de transit est de 30 charges unitaires. Les coûts horaires de transport incluant le salaire des conducteurs et l'utilisation des camions sont de 85 \$. Étant donné que la matrice de distance est exprimée en minutes, les coûts horaires sont divisés par 60. Ensuite, le résultat sera divisé par 30 (la charge mensuelle des sites de transit, étant donné que le calcul des quantités se fait sur

une base mensuelle). Le résultat de ce calcul est le facteur H qui est donc égal au taux horaire de l'utilisation des camions divisé par la charge du site. Finalement, ce facteur H sert à transformer les distances de transport entre les sites de transit et les CT, en dollars, en le multipliant par la distance de transport (en Km) entre les sites de transit et les centres de traitement.

$$H = \frac{85\$}{30 * 60} (\$/\text{min}/\text{charge})$$

### 5.3 La fonction objective

Les éléments dont la fonction objective tient compte, sont les suivants:

- Les quantités du matériel de retour exprimées en charges.
- Les coûts de transport entre les sites de transit et les centres de traitement.  
Ceux-ci sont calculés en multipliant les temps de transport par le taux horaire de l'activité du transport
- Les coûts fixes.

Les variables du modèle, la fonction objective ainsi que les contraintes sont présentées ci-contre.

#### Indices

i	Site de transit
j	Centre de traitement

#### Paramètres

$T_{ij}$	Distance (en heure) entre un site de transit i et le centre de traitement j
$F_j$	Coûts fixes correspondant à chaque centre de traitement j
$Max_j$	Capacité maximale du centre de traitement j
M	Très grand nombre
$A_i$	Quantité totale annuelle du matériel de retour au site de transit i
H	Facteur des coûts horaires de transport

#### Variables de décision

$S_i$	0/1 pour la sélection d'un centre de traitement j
$Q_{ij}$	Quantité du matériel de retour expédié d'un centre de transit i vers un centre de traitement j

$$\text{Min } Z = \sum_i \sum_j Q_{ij} * T_{ij} * H + \sum_j F_j * S_j \quad (1)$$

Sujet à :

$$\sum_i \sum_j Q_{ij} \leq \text{Max}_j \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_j Q_{ij} = A_i \quad \forall i, j \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_j Q_{ij} \leq M * S_j \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$Q_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$S_j = 0, 1 \quad \forall i, j \quad (6)$$

F, T et Q : variable entière

#### 5.4 La Modélisation

Étant donné que tout le matériel de retour est exprimé en unité de charge. Le modèle utilisé est un modèle mixte qui comprend des variables entières et binaires. Ceci est pour convenir à la nature du matériel acheminé à travers le réseau de retour de ce des MDR. Les quantités désignées dans le modèle sont des quantités mensuelles. Les variables décisionnelles sont les quantités expédiées des sites de transit i aux centres de traitement j et les centres sélectionnés. Ce qui a rendu plus facile la modélisation du problème de retour des MDR est l'uniformité du matériel de retour qui consiste en des charges identiques.

Les contraintes

- La contrainte (2) assure que les quantités expédiées ne dépassent pas les capacités des centres de traitement.
- La contrainte (3) assure que les quantités envoyées sont égales aux quantités annuelles reçues.
- La contrainte (4) assure qu'au cas de l'envoi d'une quantité positive du matériel de retour du site i vers le centre j, celui-ci doit être ouvert.

### **5.5 L'outil de résolution**

Le logiciel LINGO a été utilisé pour déterminer la solution optimale du modèle proposé.

### **5.6 Les résultats**

Les quantités optimales sont présentées dans le tableau 13

Tableau 13: Quantités optimales acheminées vers les CT sélectionnés

# site de Transit	Site de Transit	Qté expédiée du CT de Montréal	Qté expédiée du CT de SH	Qté expédiée du CT de Québec	Qté expédiée du CT de SJ
1-140	Bout de l'île	62	.		
2-150	Jarry	39			
3-250	SH		21		
4-260	Sorel		8		
5-270	Drummondville		12		
6-330	St Bruno		24		
7-340	Victoriaville		14		
8-350	Valleyfield		10		
9-370	Granby		9		
10-380	St Jean		12		
11-390	Châteauguay		46		
12-400	Vaudreuil				21
13-410	Sherbrooke		11		
15-460	Trois-Rivières		75		
16-480	Beauport			16	
17-500	Thetford Mines		22		
18-510	Lévis			21	
19-550	Îles de la Madeleine			13	
20-570	Rimouski			31	
21-600	Rivière du Loup			14	
22-610	Gaspé			2	
23-630	Carleton			8	
24-640	Baie-Comeau			48	
25-660	Sept-Îles			12	
26-670	Poste Montagnais				
27-690	Forestville			14	
28-720	Blainville				14
29-740	Hull				52
30-780	Papineauville				4
31-800	Joliette				18
32-820	Rawdon				8
33-840	St-Jovite				15

Tableau 13: Quantités optimales acheminées vers les CT sélectionnés (Suite)

# site de Transit	Site de Transit	Qté expédiée du CT de Montréal	Qté expédiée du CT de SH	Qté expédiée du CT de Québec	Qté expédiée du CT de SJ
34-860	Mont-Laurier				3
35-890	Laval				24
36-910	Chicoutimi			25	
38-940	Chibougamau			7	
39-950	Rouyn-Noranda				19
40-970	Amos				4
41-1010	Val d'Or				8
42-1060	LG-2				37
43-1070	Némiscau				11
44-1080	LG-3				9
45-1090	LG-4				17
46-1120	CERV/IREQ		19		
47-1620	Québec			54	
48-1630	St-Jérôme				30
% de la quantité affectée au centre		10.7	29.4	21.1	31.8

CT= Centre de traitement, SH=Sainte Hyacinthe, SJ=Saint Jérôme

### 5.7 Commentaires sur les résultats

Concernant les quantités optimales présentées dans le tableau 13, on constate qu'environ le tiers de la quantité de charges de retour est acheminé au site de Saint Jérôme. Il y a un grand écart en terme de charges avec le centre de Montréal qui ne reçoit que 10% du matériel de retour. Pour les deux sites de transit qui sont situés à Montréal, le centre de destination est celui de Jarry. Le facteur de transport a donc été plus influençant pour déterminer les centres de traitement vers lesquels les quantités seront acheminées à partir de ces deux sites. Par contre, il y a des sites à partir desquels il n'était pas possible d'envoyer leurs charges au centre de Montréal (le site de Laval), à cause de la contrainte de la capacité.

De même, tous les centres de traitement ont été sollicités. Ceci est dû à la localisation actuelle des centres de Traitement par rapport aux sites de transit.

Les coûts mensuels totaux du système s'élèvent à 51 083 \$.



L'analyse des résultats montre que la charge est presque uniforme pour les trois centres de traitement de Sainte Hyacinthe, de Québec et de Saint Jérôme. Le centre de traitement de Montréal reçoit une charge assez inférieure, proportionnelle à sa capacité. Ceci est démontré par le tableau 13 et la figure 12.

### **5.8 Commentaires généraux**

Le modèle développé pour résoudre le problème de retour des matières dangereuses résiduelles, a été conçu pour un cas typique de logistique inverse. L'avantage de ce modèle est qu'il permet de planifier le réseau de logistique inverse en fonction des coûts de transport et des coûts associés aux installations. Le modèle peut aussi être utilisé ou modifié pour résoudre des problèmes similaires de logistique inverse, dans différents contextes. Le problème actuel ne comporte aucune restriction sur l'expédition des unités vers les centres de traitement. Ceci a offert une plus grande liberté pour déterminer la sélection des sites. De même, les processus de traitement ont été considérés similaires dans tous les centres. Ceci a permis au modèle d'aboutir à une sélection des sites, basée principalement sur les capacités des centres de traitement et des coûts de transport.

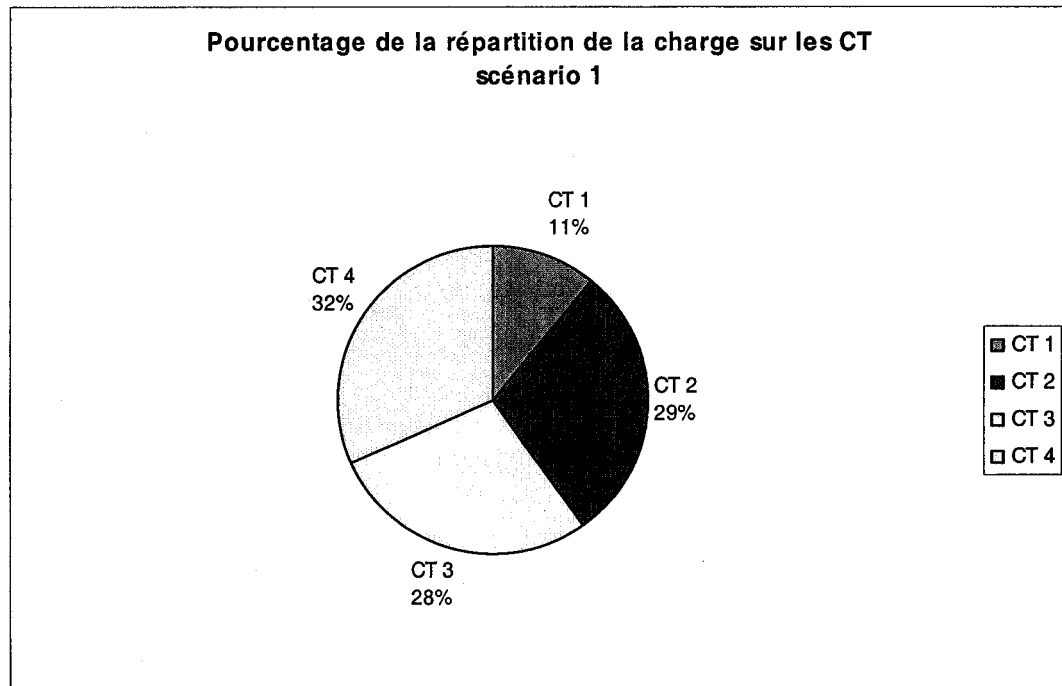


Figure 12: Répartition de la charge sur les centres de traitement

### 5.9 Conclusions et recommandations

A la suite de cette étude, il a été possible de déterminer les quantités optimales acheminées des sites de transit vers les centres de traitement. Ces quantités varient significativement d'un site à l'autre.

De même, il a été démontré que tous les centres de traitement sont sollicités dans la solution optimale.

Les résultats du modèle d'optimisation des MDR montrent que les centres de traitement de Sainte Hyacinthe, de Québec et de Saint Jérôme reçoivent plus de charges, comparativement au quatrième centre situé à Montréal. Ainsi, l'expansion du centre de traitement de Montréal est recommandée, afin d'aboutir à une solution qui offre une répartition plus équilibrée des charges, sur les centres de traitement. Les résultats ont aussi démontré que la capacité des centres est suffisante pour répondre aux besoins actuels du traitement des MDR. Ainsi, il n'y a aucun besoin d'augmenter le nombre de centres.

### **5.10 Positionnement du modèle par rapport aux modèles classifiés**

Un positionnement du modèle proposé par rapport à la classification déjà faite au chapitre 2, est présentée ci-dessous.

- Type d'industrie: la récupération des Matières Dangereuses Résiduelles.
- Types de contraintes: capacité et conservation des flux.
- Outil de résolution: Lingo.
- Nature du modèle: Modèle à variables entières et mixtes.
- Objectifs : déterminer les quantités de transports acheminées à travers le réseau de retour des MDR et les localisations optimales des installations.
- Composantes de la fonction objective: Les coûts de transport et les coûts fixes.
- Objectif de retour : Le recyclage.
- Activités : Transport et recyclage.
- Degré de liberté de choix : Choix parmi un groupe d'installations prédéfini.

## **Chapitre 6**

### **Scénarios**

#### **6.1 Introduction**

Ce chapitre comprend l'étude de différents scénarios où plusieurs options concernant le transport des matières dangereuses résiduelles sont examinées. Ces scénarios comportent des changements dans les capacités des installations et les localisations des centres de traitement du système des MDR. Différentes options concernant le nombre de centres de traitement sont explorées. Ces scénarios sont étudiés afin de mesurer l'impact des changements des localisations des installations sur les coûts de transport.

Quant aux centres de traitement, il est possible d'augmenter la capacité de chaque centre jusqu'au double. Ceci se fait tout en maintenant constante la capacité totale des centres. Ainsi, les coûts totaux de traitement ne changent pas. Le scénario initial (scénario 1) déjà étudié dans le chapitre précédent est comparé dans ce chapitre, avec les scénarios 2, 3, 4, 5 et 6. Ces scénarios ont pour but de mesurer l'impact du changement des localisations et des capacités sur les coûts totaux associés au réseau de retour des MDR. Les données correspondantes à chaque scénario sont présentées dans les annexes A, C, D, E, F.

#### **6.2 Description du scénario 2**

Dans le scénario initial (scénario 1), il était évident que le centre de traitement de Montréal ayant la plus petite capacité recevait une quantité inférieure de matériel de retour, comparé aux trois autres centres.

Le scénario 2 comporte la fermeture du centre de traitement de Montréal et l'augmentation de la capacité des trois autres centres. La capacité du centre fermé est répartie également sur les trois centres restants. Une augmentation des coûts de transport est attendue. L'impact de ce changement sur les quantités acheminées aux trois centres est mesuré. Le coût mensuel total de ce scénario est de 44 090 \$. Les chiffres présentés au tableau 14 représentent les quantités optimales expédiées des sites de transit aux centres de traitement pour le scénario 2.

Tableau 14: Répartition des charges optimales sur les CT

# site Transit	Site Transit	Qté expédiée du CT de SH	Qté expédiée du CT de Québec	Qté expédiée du CT de SJ
1-140	Bout de l'île	62		
2-150	Jarry			39
3-250	SH	21		
4-260	Sorel	8		
5-270	Drummondville	12		
6-330	St Bruno	24		
7-340	Victoriaville	14		
8-350	Valleyfield	10		
9-370	Granby	9		
10-380	St Jean	12		
11-390	Châteauguay	46		
12-400	Vaudreuil			21
13-410	Sherbrooke	11		
14-430	La Tuque			
15-460	Trois-Rivières	75		
16-480	Beauport		16	
17-500	Thetford Mines		22	
18-510	Lévis		21	
19-550	Îles de la Madeleine		13	
20-570	Rimouski		31	
21-600	Rivière du Loup		14	
22-610	Gaspé		2	
23-630	Carleton		8	
24-640	Baie-Comeau		48	
25-660	Sept-Îles		12	
27-690	Forestville		14	
28-720	Blainville			14

Tableau 14: Répartition des charges optimales sur les CT (Suite)

# site Transit	Site Transit	Qté expédiée du CT de SH	Qté expédiée du CT de Québec	Qté expédiée du CT de SJ
29-740	Hull			52
30-780	Papineauville			4
31-800	Joliette			18
32-820	Rawdon			8
33-840	St-Jovite			15
34-860	Mont-Laurier			3
35-890	Laval			24
36-910	Chicoutimi		25	
37-930	St-Félicien			
38-940	Chibougamau		7	
39-950	Rouyn-Noranda			19
40-970	Amos			4
41-1010	Val d'Or			8
42-1060	LG-2			37
43-1070	Némiscau			11
44-1080	LG-3			9
45-1090	LG-4			17
46-1120	CERV/IREQ	19		
47-1620	Québec		54	
48-1630	St-Jérôme			30
% de la quantité affectée au centre		34,3	30.4	35.3

CT= Centre de traitement, SH=Sainte Hyacinthe, SJ=Saint Jérôme

Dans le scénario 2, les charges unitaires sont uniformément réparties sur les trois centres de traitement. De même, le taux d'utilisation est égal à 100% pour toutes les installations.

Il y a une réduction significative, de 14% dans les coûts totaux du système. Ceci est dû à la réduction des coûts fixes associés à l'installation éliminée. Une augmentation des coûts de transport de 2% est également détectée. La répartition de la charge sur les centres de traitement pour le scénario 2 est présentée par la figure 13.

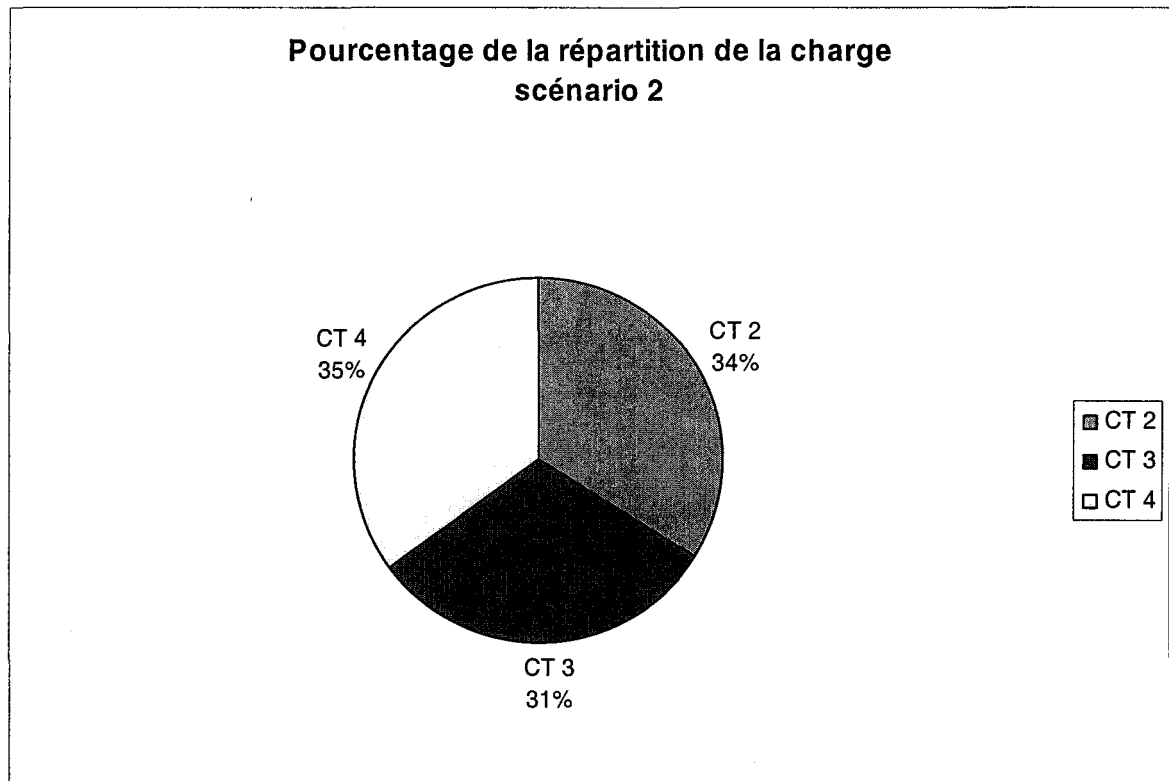


Figure 13: Répartition de la charge sur les centres de traitement pour le scénario 2

### 6.3 Description du scénario 3

Dans le chapitre précédent, il a été démontré que la capacité du centre de traitement de Montréal a besoin d'être augmentée. Le centre de Saint-Jérôme avait la capacité maximale parmi les quatre centres. La moyenne arithmétique pour les capacités des CT de Montréal et de Saint-Jérôme est calculée. Les capacités des centres de traitement de Montréal et de Saint-Jérôme vont être équilibrées. La capacité du centre de Saint-Jérôme est ainsi diminuée à cette moyenne. Ceci sert à mesurer l'impact de l'augmentation en capacité du centre de traitement de Montréal sur l'acheminement des charges à travers le réseau. Un changement dans les coûts de transport et les coûts totaux du système est détecté. Le coût mensuel total de ce scénario est de 50 965\$. Les quantités optimales du scénario 3 sont présentées dans le tableau 15.

Tableau 15: Répartition des charges optimales pour le scenario 3

# site Transit	Site Transit	Qté expédiée du CT de Montréal	Qté expédiée du CT de SH	Qté expédiée du CT de Québec	Qté expédiée du CT de SJ
1-140	Bout de l'île	62			
2-150	Jarry	39			
3-250	SH		21		
4-260	Sorel		8		
5-270	Drummondville		12		
6-330	St Bruno		24		
7-340	Victoriaville		14		
8-350	Valleyfield	10			
9-370	Granby		9		
10-380	St Jean		12		
11-390	Châteauguay		46		
12-400	Vaudreuil	21			
13-410	Sherbrooke		11		
14-430	La Tuque				
15-460	Trois-Rivières		75		
16-480	Beauport			16	
17-500	Thetford Mines		22		
18-510	Lévis			21	
19-550	Îles de la Madeleine			13	
20-570	Rimouski			31	
21-600	Rivière du Loup			14	
22-610	Gaspé			2	
23-630	Carleton			8	
24-640	Baie-Comeau			48	
25-660	Sept-Îles			12	
26-670	Poste Montagnais				
27-690	Forestville			14	
28-720	Blainville	14			
29-740	Hull				52
30-780	Papineauville				4
31-800	Joliette	18			
32-820	Rawdon	8			
33-840	St-Jovite				15
34-860	Mont-Laurier				3
35-890	Laval	24			
36-910	Chicoutimi			25	



Tableau 15: Répartition des charges optimales pour le scénario 3 (Suite)

# site Transit	Site Transit	Qté expédiée du CT de Montréal	Qté expédiée du CT de SH	Qté expédiée du CT de Québec	Qté expédiée du CT de SJ
37-930	St-Félicien				
38-940	Chibougamau			7	
39-950	Rouyn-Noranda				19
40-970	Amos				4
41-1010	Val d'Or				8
42-1060	LG-2				37
43-1070	Némiscau				11
44-1080	LG-3				9
45-1090	LG-4				17
46-1120	CERV/IREQ		19		
47-1620	Québec			54	
48-1630	St-Jérôme				30
% de la quantité affectée au centre		21	29	28	22

CT=Centre de traitement, SH= Sainte Hyacinthe, SJ= Saint Jérôme

#### Commentaires scénario 3:

Le centre de traitement de Montréal reçoit un nombre plus élevé de charges originaires des sites à la proximité de ce centre tels que les sites de Blainville, Valleyfield et Vaudreuil. Dans le scénario initial, les charges originaires de ces sites sont expédiées au centre de Saint Jérôme à cause du manque de capacité. Les charges sont réparties uniformément sur les quatre installations, puisque les charges des centres de traitement varient entre 21% et 29%. La répartition plus uniforme des charges sur les centres de traitement s'est traduite en une réduction des distances de transport. Une réduction des coûts de transport de 1% est détectée. La réduction des distances de transport devait au départ réduire le risque. Néanmoins, il existe un risque dû au fait d'acheminer les MDR. Il n'est pas préférable d'acheminer les MDR à travers la région de Montréal puisqu'il s'agit d'une zone densément région peuplée.

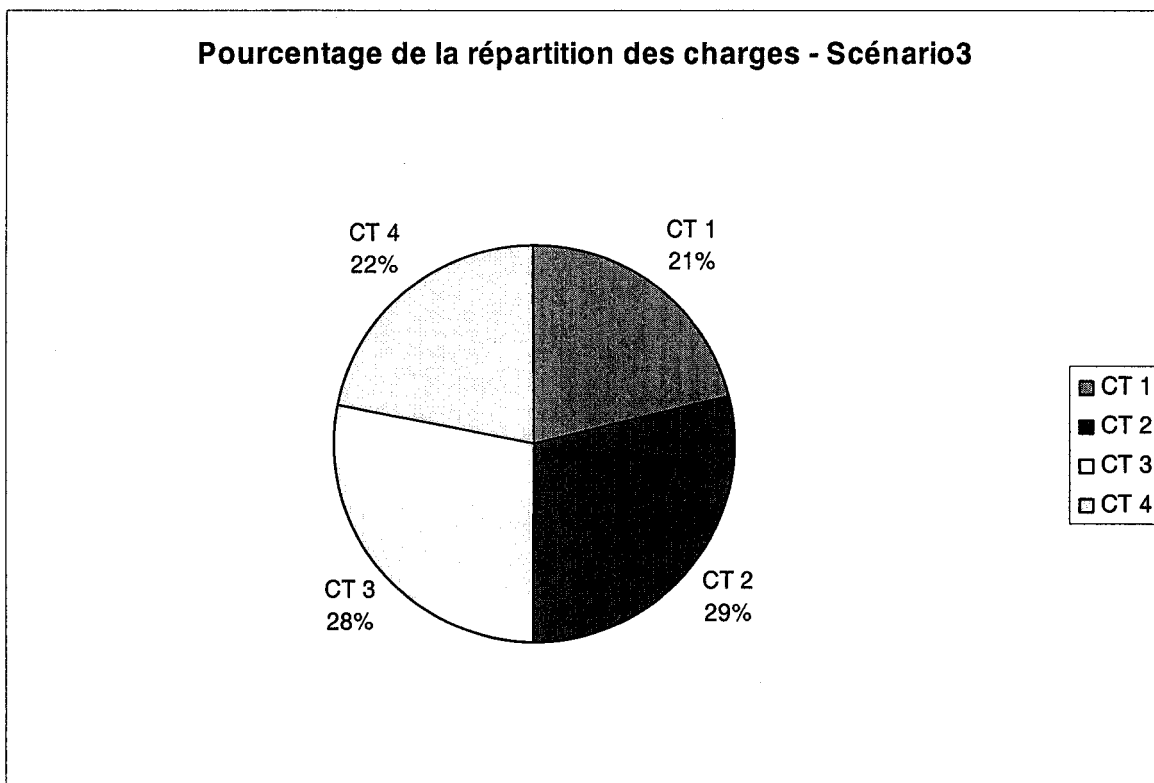


Figure 14: Répartition de la charge sur les centres de traitement pour le scénario 3

#### 6.4 Description du scénario 4

Le scénario 4 consiste en la fermeture du centre de traitement de Saint-Jérôme et l'inauguration d'un autre à Joliette ayant la même capacité. Les coûts mensuels de ce scénario s'élèvent à 51 862 \$.

#### 6.5 Description du scénario 5

Le scénario 5 comporte le déplacement du CT de Québec à La Tuque avec la même capacité de traitement. Les coûts mensuels de ce scénario s'élèvent à 53 957 \$.

## **6.6 Description du scénario 6**

Dans le scénario 6, il s'agit de déplacer le centre de traitement de Sainte Hyacinthe à Drummondville. Les coûts mensuels de ce scénario s'élèvent à 51 083 \$.

Parmi les scénarios proposés impliquant le maintien des quatre installations, il est possible de remarquer que le scénario 3 dans lequel la capacité du centre de traitement de Montréal a été augmentée, est celui dont les coûts sont les moins élevés. Le scénario 2, dans lequel le nombre des installations a été diminué à trois centres de traitement, est le scénario le plus économique.

Dans le scénario 2, la réduction significative des coûts fixes provient de la réduction des coûts de location des installations. Les coûts fixes sont liés aux bâtisses. Vu que les centres de traitement sont des installations louées, il est possible d'éliminer les coûts fixes d'une installation supprimée.

La sensibilité du système aux coûts fixes se manifeste encore dans l'analyse de sensibilité qui est présentée dans la section suivante de ce chapitre. La solution offerte par le scénario 2 est la plus économique. L'élimination de plus d'un centre de traitement n'est pas envisageable par la direction du réseau de logistique. Par conséquent, le scénario comportant l'élimination de deux centres de traitement n'a pas été considéré. Il est évident que le fait de maintenir trois centres ouverts permet de diminuer les distances de transport. Ceci permet de maintenir les risques associés au transport des matières dangereuses à des niveaux acceptables. Les coûts associés aux différents scénarios (de 1 à 6) sont présentés par la figure 15.

Les résultats montrent que les coûts associés au scénario initial sont inférieurs aux scénarios (3, 4, 5 et 6) comportant quatre centres de traitement. Notre recommandation est donc de ne pas relocaliser les centres de traitement.

Les scénarios 4, 5 et 6 servent seulement à comparer les coûts de transport si les centres de traitement sont installés dans des localisations différentes des localisations actuelles. Cela a permis de juger si les localisations actuelles sont plus économiques que les scénarios proposés. Le résumé des six scénarios et de leurs coûts correspondants, est présenté dans le tableau 16. Les coûts de transport sont séparés des coûts fixes. Ils sont présentés par la figure 15.

Tableau 16: Coûts de transport séparés des coûts fixes par scénario

	Changement	Coûts \$
Scénario 1	Cas initial	51, 083
Scénario 2	Éliminer le centre traitement de Montréal	44, 090
Scénario 3	Augmenter la capacité du centre de traitement de Montréal	50, 965
Scénario 4	Déplacer le Centre de traitement de St Jérôme à Joliette	51, 862
Scénario 5	Déplacer le Centre de traitement de Québec à la Tuque à Joliette	53, 957
Scénario 6	Déplacer le centre de traitement de Sainte Hyacinthe à Drummondville.	51, 152

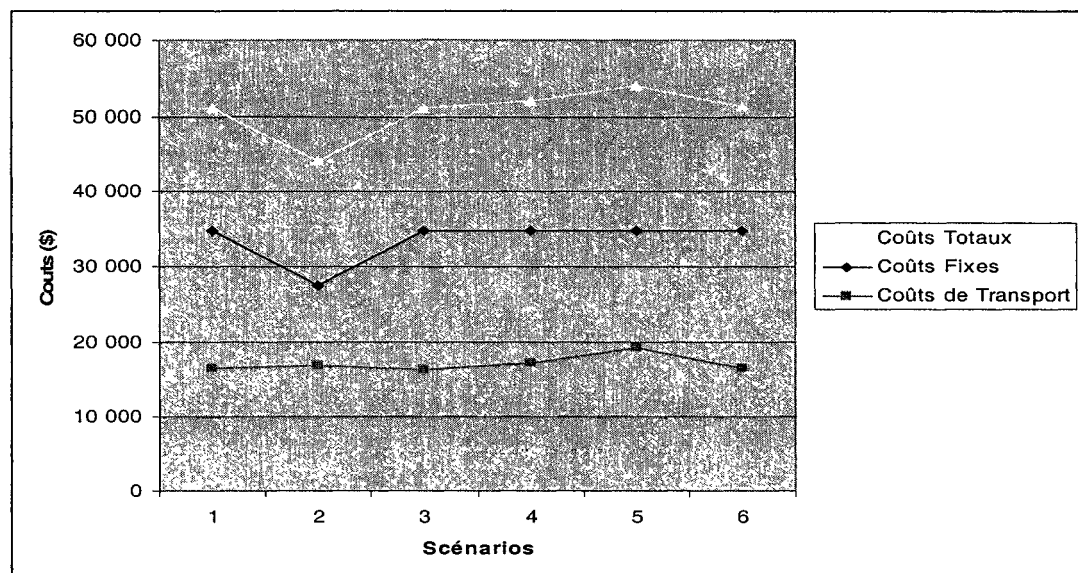


Figure 15: Coûts de transport, coûts fixes et coûts totaux pour chacun des scénarios

### **Analyse de sensibilité**

L'analyse de sensibilité est effectuée afin de déterminer les éléments de la fonction objective auxquels notre système est sensible. Ces éléments sont les coûts de transport et les coûts fixes associés aux installations. L'analyse comporte l'augmentation graduelle de chaque élément de la fonction objective. L'augmentation se fera par tranches de 10 % jusqu'à atteindre une augmentation totale de 40%. Ensuite, l'impact de cette augmentation sur les coûts mensuels, sera observé. L'hypothèse que l'augmentation des coûts fixes aura lieu également aux quatre CT, a été étudiée et approuvée par les dirigeants de l'entreprise.

Le tableau 17 présente la variation des coûts totaux suivant l'augmentation des coûts de transport.

#### **6.6.1 Augmentation des coûts de transport**

Tableau 17: Augmentation des coûts totaux avec augmentation des coûts de transport

Num.	Pourcentage de l'Augmentation dans les coûts de transport	Coûts totaux (\$)
1	100%	51083
2	110%	52725
3	120%	54367
4	130%	56008
5	140%	57650

La figure 16, montre l'effet de l'augmentation des coûts de transport sur les coûts totaux.

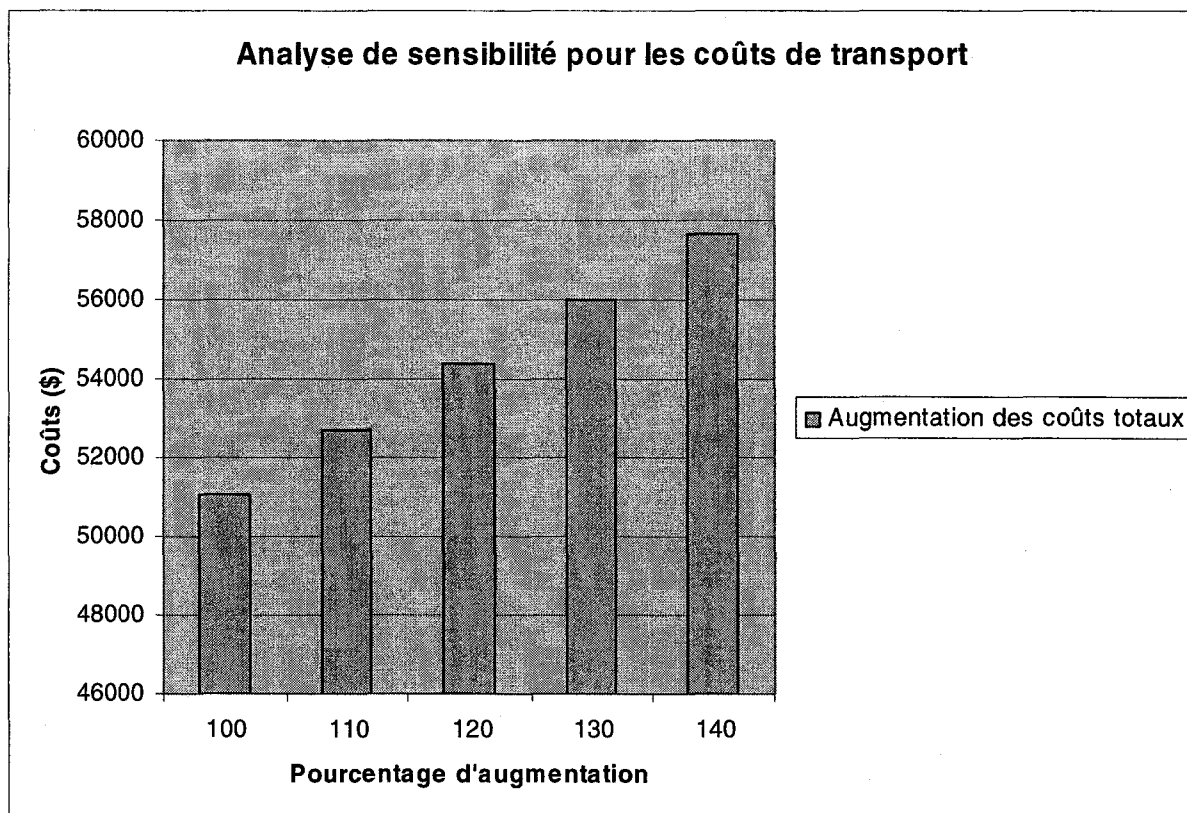


Figure 16: Analyse de sensibilité pour les coûts de transport

### 6.6.2 Augmentation des coûts fixes

Le tableau 18 présente la variation des coûts mensuels totaux suivant l'augmentation des coûts fixes.

Tableau 18: L'augmentation des coûts totaux avec les coûts fixes

Num.	Pourcentage de l'augmentation dans les coûts fixes	Coûts totaux (\$)
1	100%	51083
2	110%	54550
3	120%	58017
4	130%	61483
5	140%	64950

La figure 17 montre l'augmentation des coûts fixes causée par l'augmentation des coûts de transport par tranches de 10%

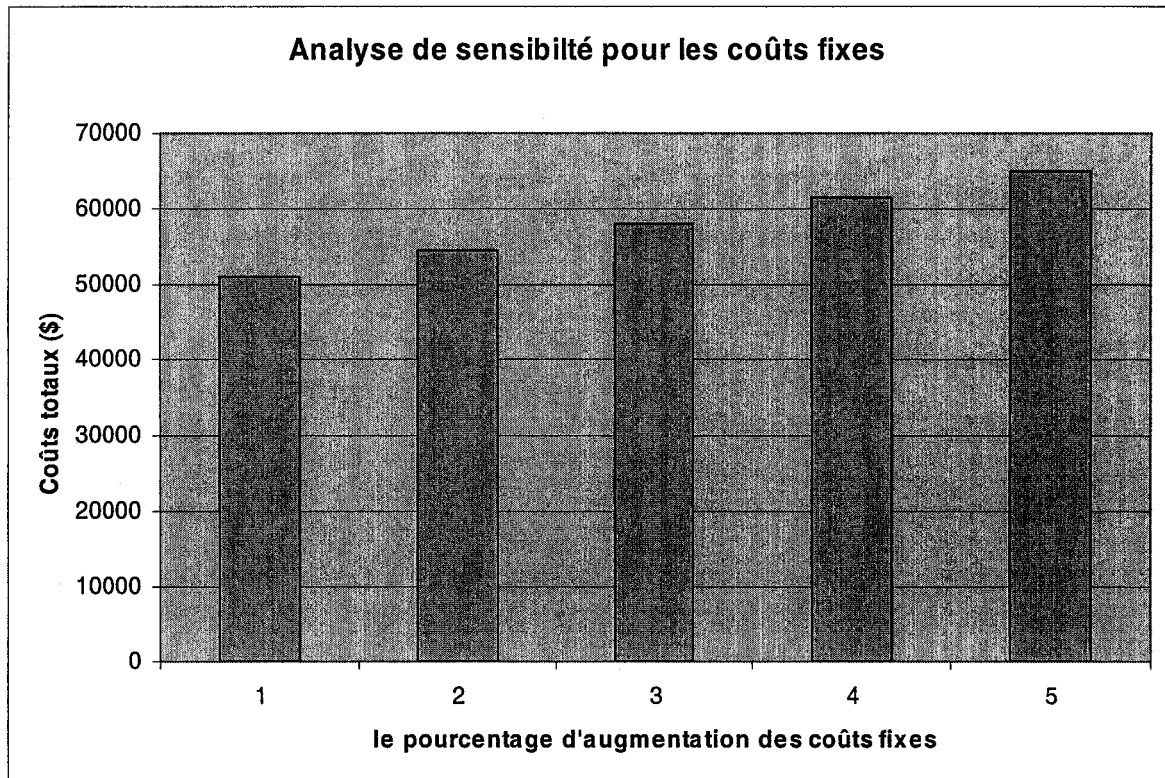


Figure 17: Analyse de sensibilité pour les coûts fixes

La courbe des coûts fixes est plus aigue que celle des coûts de transport. Le réseau de retour des matières dangereuses résiduelles est donc plus sensible aux changements dans les coûts fixes. L'impact de l'augmentation des coûts de transport et des coûts fixes est montré par la figure 18. La sensibilité du système aux coûts fixes, a causé une réduction significative des coûts totaux du réseau (13% de diminution des coûts entre le scénario 1 et 2, en diminuant le nombre des installations à trois centres de traitement.

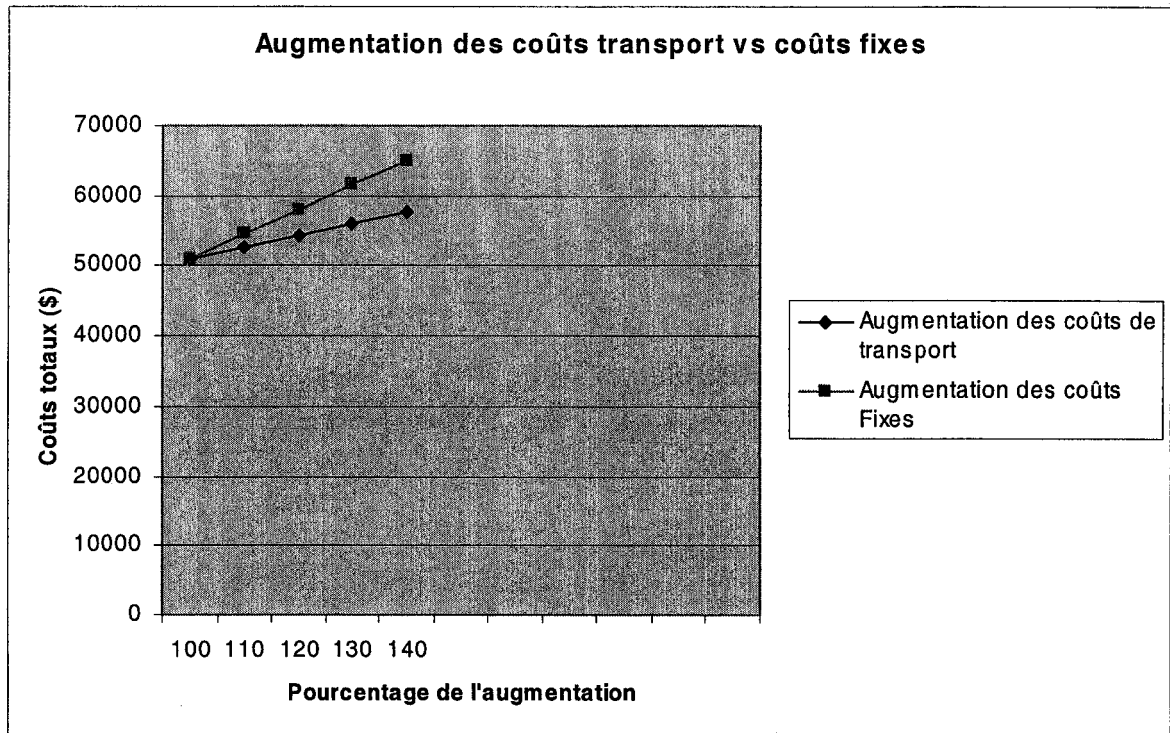


Figure 18: L'augmentation des coûts de transport des coûts fixes par tranches de 10%

### 6.7 Analyses et comparaison

A moyen terme, les coûts associés au système de retour des MDR peuvent être sujets à l'augmentation, surtout avec la hausse témoignée des prix de l'essence. Dans cette section finale, l'étude de l'impact de l'augmentation des coûts de transport et les coûts fixes associés aux installations sera faite pour les scénarios 1 et 2. Une comparaison entre l'augmentation des coûts de transport et des coûts fixes dans les scénarios 1 et 2 est présentée dans le tableau 19. Les résultats sont schématisés par le tableau 19 et les figures 19 et 20.



Tableau 19: Comparaison entre les effets de l'augmentation des coûts de transport et les coûts fixes sur les coûts totaux pour les scénarios 1 et 2

Coûts de Transport	Coûts fixes	Coûts en \$ scénario 1	Pourcentage d'augmentation	Coûts en \$ scénario 2	Pourcentage d'augmentation
Aucune augmentation	Aucune augmentation	51083	0	44 090	0
Augmentation 10 %	Aucune augmentation	52725	3.2	45764	3.8
Aucune augmentation	Augmentation 10 %	54550	6.8	46825	6.2
Augmentation 10 %	Augmentation 10 %	56192	10	48499	10

Avec l'augmentation des coûts de transport de 10% on remarque que les coûts totaux augmentent de plus de 3% pour le scénario 1 et de 3.8% pour le scénario 2. Lorsque les coûts fixes augmentent de 10% pour les 2 scénarios, les coûts totaux augmentent de plus de 6 %. La réduction des coûts de transport est due à la minimisation significative des distances parcourues par les camions transportant les MDR.

Pour le scénario 2, même avec une augmentation de 10 % des coûts fixes, les coûts totaux de ce scénario restent inférieurs à ceux du scénario initial.

Les coûts de transport dans le scénario 1 sont 13 % plus élevés que ceux du scénario 2, en cas d'une augmentation des coûts de transport de 10%. De même, cette différence atteint 14% en cas de l'augmentation des coûts fixes de 10%.

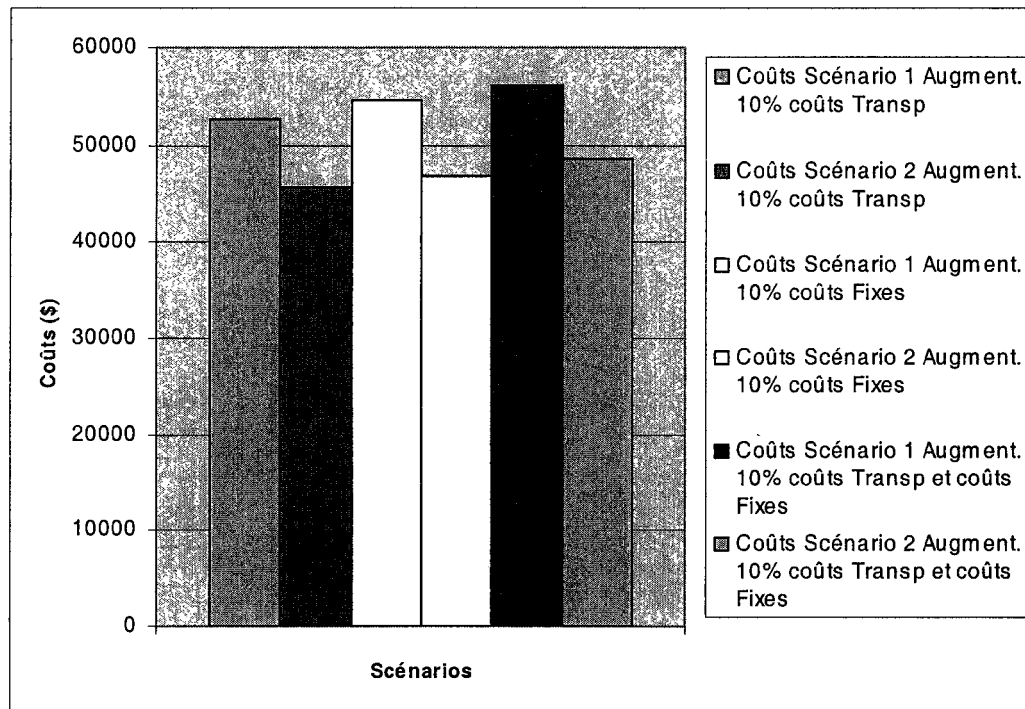


Figure 19: Effet de l'augmentation des coûts de transport et des coûts fixes de 10%

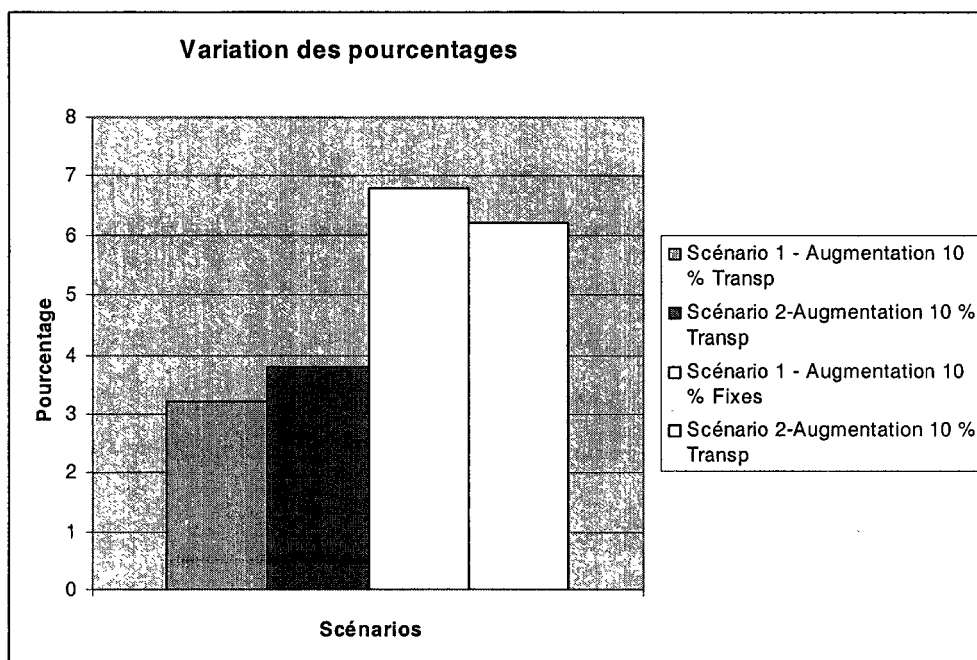


Figure 20: Variation de pourcentage de l'augmentation des coûts fixes et des coûts de transport entre le scénario 1 et 2

### **Conclusion et futures recherches**

Le premier objectif de cette recherche était de présenter la logistique inverse comme étant un thème émergeant dans la vie des entreprises. Il était important de présenter les défis liés à la complexité de la problématique de retour, et que les entreprises doivent affronter. L'importance de la logistique inverse a également été soulignée en mettant l'accent sur l'aspect économique et l'aspect environnemental.

La recherche a aussi les objectifs suivants:

- Déterminer les paramètres qui gouvernent les systèmes de logistique inverse.
- Étudier l'aspect du transport et son influence sur le réseau de retour.
- Mesurer l'impact des variations des éléments de la fonction objective sur le système de retour.

La revue de la littérature a permis de déterminer les paramètres et les caractéristiques principales de la chaîne de logistique inverse, ainsi que les activités essentielles au fonctionnement du réseau de retour. Dans une étape ultérieure, l'étude, l'analyse et la classification de plusieurs modèles mathématiques traitant le problème de logistique inverse ont été faites dans les chapitres 2 et 3.

Cette étude a permis :

- Une compréhension suffisante du cas de retour des MDR.
- Une définition des paramètres et des variables décisionnelles du réseau de retour.
- Un développement du modèle d'optimisation et déterminer les éléments de la fonction objective.

- Un choix de l'outil de solution.
- Un calcul de la solution optimale.

La connaissance approfondie des spécificités du problème de logistique inverse et des étapes et de l'approche à suivre en cas du traitement d'un problème de retour a permis d'un meilleur traitement du problème de retour dans un contexte industriel spécifique.

L'application a été faite sur le système de retour des MDR a été faite. pour ce système, la solution optimale a été trouvée en déterminant les quantités optimales acheminées à travers le réseau. L'analyse de sensibilité sur les éléments du système de retour a démontré que le système de retour des MDR est plus sensible aux coûts fixes qu'aux coûts de transport. En outre, plusieurs scénarios ont été explorés. Ce qui a abouti à la conclusion que les localisations des installations actuelles ne doivent pas être changées ni augmenté.

L'impact de la variation des composantes de la fonction objective a été mesuré. Une comparaison entre les différentes possibilités et les différentes variations a été présentée.

Ce modèle peut servir aux responsables des systèmes de logistique inverse à planifier les réseaux de transport du matériel de retour et à déterminer la localisation de ces installations.

Futures recherches :

Cette recherche a traité les données correspondante à une seule année. Une future recherche pourrait porter sur l'établissement et la planification du système de retour des MDR dans les années suivantes. Ceci, en tenant compte de la croissance du

réseau. Ceci permettra de faire un suivi de l'adaptation du modèle au cas d'étude et le valider annuellement.

Le risque associé au transport des MDR peut être mesuré suivant les régions à travers lesquels le matériel est acheminé. Ensuite, il sera possible de mettre une pénalité au transport des MDR en milieu urbain, afin de prendre en considération les risques accrues du transport des MDR dans les régions peuplées.

## Bibliographie

Barros, A.I., Dekker, R., Scholten, V., 1998. A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research* 110, 199–214.

BEAULIEU, M. (2000). Définir et maîtriser la complexité des réseaux de logistique à rebours. Les Troisièmes Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique, Trois-Rivières, Qc, Ca

CALDWELL, B. (1999). Reverse Logistics – Untapped opportunities exist in returned products, a side of logistics few businesses have thought about-until now. *Information week*, 729, 48-56.

Caruso, C., Colorni, A., Paruccini, M., 1993. The regional urban solid waste management system: A modeling approach. *European Journal of Operational Research* 70, 16–30.

CLEGG, A. J., WILLIAMS, D. J., USZOY, R. (1995). Production planning for companies with remanufacturing capability. *Proceedings of the IEEE symposium on electronics and the environment*. Orlando, Florida, USA, pp 186-191.

DOWLATSHAHI, S. (2000). Developing a theory of reverse logistics. *Interfaces*; May/Jun 2000; 30, 3, (pp. 143-155)

DELANEY, B. (2003). 14th Annual State of logistics report, Cass Logistics, St. Louis, Mo, USA.

FLEISCHMANN, M., BLOEMHOF-RUWAARD, J.M., DEKKER, R. V. L. E, VAN NUNEN, J. A. E. E. et VAS WASSENHOVE, L. N. (1997). Quantitative models for

reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1-17.

Guide Jr., V.D.R., 1996. Scheduling using drum buffer-rope in a remanufacturing environment. *International Journal of Production Research* 34 (4), 1081-1091.

GONZALEZ-TORRE P. L., ADENSO-DIAZ B., ARTIBA H. (2004) . Environmental and reverse logistics policies in European bottling and packaging firms. *International Journal of production Economics* 88 (95-104).

HAW-JAN W., STEVEN C.D. (1995). Environmentally responsible logistics systems. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*. Vol. 25 No. 2, 1995 pp 20-38.

JAYARAMAN, V., PATTERSON, P.A., ROLLAND, E (2003). The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of operational research* 150 (2003) 128-149.

KERR, W. et RYAN, C. (2001). Eco-efficiency gains from remanufacturing : A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia. *Journal of Cleaner Production*. 9 (75-81).

Krikke, H.R., van Harten, A., Schuur, P.C., (1999), A Business case OCE: Reverse logistics network re-design for copiers. *OR Spektrum* 21 (3), 381–409.

KRIKE, H. R., KOOL, E.J. et SCHUUR, P.C. (1999), Network Design in Reverse Logistics: A quantitative Model. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Springer Verlag Berlin, 480, Chapter 1, pp. 45-62, 1999, editors M.G. Speranza and P. Staehly

KROON, L. et VRIJENS, G. (1995). Returnable containers: An example of reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, Vol. 25 No. 2, 1995, pp 56-68.

LEE, C.H., CHANG, C.-T et TSAI, S.-L. (1998). Development and implementation of producer responsibility recycling system. *Resources conservation and recycling*, 24(2), 121-135.

Louwers, D., Kip, B.J., Peters, E., Souren, F., Flapper, S.D.P., (1999). A facility location allocation model for reusing carpet materials. *Computers and Industrial Engineering* 36 (40), 1–15

MELBIN, J. E. (1995). The never ending cycle. *Distribution*, Oct. 1995, 94, 11; pg. 36

ROGERS D. S. et TIBBEN-LEMBKE, R. S. (1998). Going backwards: Reverse logistics trends and practices. Reverse Logistics Executive Council, Reno, NV, USA.

Rosing, K.E., ReVelle, C.S., 1997. Heuristic concentration: Two stage solution construction. *European Journal of Operational Research* 97, 75–86.

SARKIS J., Theory and Methodology: Evaluating environmentally conscious business practices. *European Journal of Operational Research*. 107 (1998) 159-174.

SARKIS J., Manufacturing strategy and environmental consciousness. *Technovation*, 15(2) (1995) 79-97.



Shih, L.-H., 2001. Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources Conservation and Recycling* 32, 55–72.

Spengler, T., Puchert, H., Penkuhn, T., Rentz, O., 1997. Environmental integrated production and recycling management. *European Journal of Operational Research* 97, 308–326.

Zografos, K.G., Samara, S.S.A., 1990. Combined location-routing model for hazardous waste transportation and disposal. *Transportation Research Record* 1245, 52–59.

**Annexe A**  
**Matrices de distances de transport entre les sites**  
**de transit et les Centres de traitement**

Scenario 1					
Sites trans.		CT-1	CT-2	CT-3	CT-4
		140	250	1620	1630
Bout-de-L'Ile	140	0	70	160	55
Jarry	150	24	60	163	39
CAS St-Hyacinthe	250	70	0	124	87
CAS Sorel	260	85	45	136	102
CAS Drummondville	270	101	38	98	118
CAS St-Bruno	330	45	32	148	62
CAS Victoriaville	340	127	72	79	151
CAS Valleyfield	350	63	90	202	74
CAS Granby	370	74	37	150	91
CAS St-Jean	380	51	45	162	68
CAS Chateauguay	390	43	57	201	55
CAS Vaudreuil	400	45	74	184	56
CAS Sherbrooke	410	112	76	141	129
CAS La Tuque	430	195	194	172	219
CAS Trois-Rivières	460	81	82	81	105
Beauport	480	166	130	11	193
Thetford-Mines	500	179	121	78	205
Lévis	510	169	124	22	195
Îles de la Madeleine	550	821	775	673	847
Rimouski	570	352	306	204	379
Rivière-du-Loup	600	276	231	128	303
Gaspé	610	641	595	493	668
Carleton	630	544	498	396	570
Baie-Comeau	640	467	429	311	493
Sept-Îles	660	641	603	486	668
Poste Montagnais	670	0	0	0	0
Forestville	690	392	354	236	419
Blainville	720	47	80	176	24
Hull	740	155	188	284	122
Papineauville	780	107	139	236	74

Joliette	800	45	95	136	56
Rawdon	820	52	103	156	45
St-Jovite	840	100	132	229	55
Mont-Laurier	860	181	213	310	136
Laval	890	33	67	170	33
Chicoutimi	910	312	275	156	338
St-Félicien	930	323	322	211	350
Chibougamau	940	497	495	384	523
Rouyn-Noranda	950	480	513	609	436
Amos	970	452	485	581	408
Val d'Or	1010	402	434	531	357
LG-2	1060	1059	1094	1191	1017
Némiscau	1070	1037	1072	1168	995
LG-3	1080	1099	1134	1230	1057
LG-4	1090	1240	1275	1371	1198
CERV/IREQ	1120	58	37	152	75
Québec	1620	160	124	0	187
St-Jérôme	1630	55	87	187	0

## Scenario 2

## Sites trans.

		CT-2	CT-3	CT-4
		250	1620	1630
Bout-de-L'Ile	140	70	160	55
Jarry	150	60	163	39
CAS St-Hyacinthe	250	0	124	87
CAS Sorel	260	45	136	102
CAS Drummondville	270	38	98	118
CAS St-Bruno	330	32	148	62
CAS Victoriaville	340	72	79	151
CAS Valleyfield	350	90	202	74
CAS Granby	370	37	150	91
CAS St-Jean	380	45	162	68
CAS Chateauguay	390	57	201	55
CAS Vaudreuil	400	74	184	56
CAS Sherbrooke	410	76	141	129
CAS La Tuque	430	194	172	219
CAS Trois-Rivières	460	82	81	105
Beauport	480	130	11	193

Thetford-Mines	500	121	78	205
Lévis	510	124	22	195
Îles de la Madeleine	550	775	673	847
Rimouski	570	306	204	379
Rivière-du- Loup	600	231	128	303
Gaspé	610	595	493	668
Carleton	630	498	396	570
Baie-Comeau	640	429	311	493
Sept-Îles	660	603	486	668
Poste Montagnais	670	0	0	0
Forestville	690	354	236	419
Blainville	720	80	176	24
Hull	740	188	284	122
Papineauville	780	139	236	74
Joliette	800	95	136	56
Rawdon	820	103	156	45
St-Jovite	840	132	229	55
Mont-Laurier	860	213	310	136
Laval	890	67	170	33
Chicoutimi	910	275	156	338
St-Félicien	930	322	211	350
Chibougamau	940	495	384	523
Rouyn- Noranda	950	513	609	436
Amos	970	485	581	408
Val d'Or	1010	434	531	357
LG-2	1060	1094	1191	1017
Némiscau	1070	1072	1168	995
LG-3	1080	1134	1230	1057
LG-4	1090	1275	1371	1198
CERV/IREQ	1120	37	152	75
Québec	1620	124	0	187
St-Jérôme	1630	87	187	0

## Scénario 4

Sites trans		Jarry	CAS St-Hyacinthe	Québec	Joliette
Bout-de-L'île	140	24	70	160	45
Jarry	150	0	60	163	48
CAS St-Hyacinthe	250	60	0	124	95
CAS Sorel	260	74	45	136	110

CAS	270	90	38	98	104
Drummondville					
CAS St-Bruno	330	34	32	148	71
CAS Victoriaville	340	123	72	79	103
CAS Valleyfield	350	48	90	202	86
CAS Granby	370	63	37	150	99
CAS St-Jean	380	40	45	162	78
CAS					
Chateauguay	390	29	57	201	67
CAS Vaudreuil	400	31	74	184	68
CAS					
Sherbrooke	410	101	76	141	137
CAS La Tuque	430	198	194	172	171
CAS Trois-					
Rivières	460	84	82	81	56
Beauport	480	169	130	11	142
Thetford-Mines	500	173	121	78	154
Lévis	510	172	124	22	144
Îles de la					
Madeleine	550	824	775	673	796
Rimouski	570	355	306	204	327
Rivière-du-Loup	600	279	231	128	252
Gaspé	610	644	595	493	616
Carleton	630	547	498	396	519
Baie-Comeau	640	470	429	311	442
Sept-Îles	660	644	603	486	617
Poste					
Montagnais	670	0	0	0	0
Forestville	690	395	354	236	367
Blainville	720	31	80	176	61
Hull	740	139	188	284	161
Papineauville	780	91	139	236	113
Joliette	800	48	95	136	0
Rawdon	820	54	103	156	26
St-Jovite	840	84	132	229	100
Mont-Laurier	860	165	213	310	181
Laval	890	19	67	170	54
Chicoutimi	910	315	275	156	287
St-Félicien	930	326	322	211	299
Chibougamau	940	500	495	384	472
Rouyn-Noranda	950	464	513	609	481
Amos	970	436	485	581	453
Val d'Or	1010	386	434	531	402
LG-2	1060	1048	1094	1191	1060
Némiscau	1070	1026	1072	1168	1038

LG-3	1080	1088	1134	1230	1100
LG-4	1090	1229	1275	1371	1241
CERV/IREQ	1120	47	37	152	83
Québec	1620	163	124	0	136
St-Jérôme	1630	39	87	187	56

## Scenario 5

Name- sites trans		CT-1	CT-2	La Tuque	CT-4
Bout-de-L'Île	140	24	70	195	55
Jarry	150	0	60	198	39
CAS St-					
Hyacinthe	250	60	0	194	87
CAS Sorel	260	74	45	177	102
CAS					
Drummondville	270	90	38	168	118
CAS St-Bruno	330	34	32	218	62
CAS Victoriaville	340	123	72	166	151
CAS Valleyfield	350	48	90	237	74
CAS Granby	370	63	37	220	91
CAS St-Jean	380	40	45	228	68
CAS					
Chateauguay	390	29	57	218	55
CAS Vaudreuil	400	31	74	219	56
CAS					
Sherbrooke	410	101	76	211	129
CAS La Tuque	430	198	194	0	219
CAS Trois-					
Rivières	460	84	82	121	105
Beauport	480	169	130	178	193
Thetford-Mines	500	173	121	217	205
Lévis	510	172	124	180	195
Îles de la					
Madeleine	550	824	775	832	847
Rimouski	570	355	306	364	379
Rivière-du-Loup	600	279	231	288	303
Gaspé	610	644	595	653	668
Carleton	630	547	498	555	570
Baie-Comeau	640	470	429	402	493
Sept-Îles	660	644	603	576	668
Poste	670	0	0	0	0

Montagnais					
Forestville	690	395	354	327	419
Blainville	720	31	80	211	24
Hull	740	139	188	319	122
Papineauville	780	91	139	271	74
Joliette	800	48	95	171	56
Rawdon	820	54	103	182	45
St-Jovite	840	84	132	261	55
Mont-Laurier	860	165	213	342	136
Laval	890	19	67	205	33
Chicoutimi	910	315	275	170	338
St-Félicien	930	326	322	137	350
Chibougamau	940	500	495	311	523
Rouyn-Noranda	950	464	513	642	436
Amos	970	436	485	586	408
Val d'Or	1010	386	434	563	357
LG-2	1060	1048	1094	1149	1017
Némiscau	1070	1026	1072	1128	995
LG-3	1080	1088	1134	1189	1057
LG-4	1090	1229	1275	1330	1198
CERV/IREQ	1120	47	37	214	75
Québec	1620	163	124	172	187
St-Jérôme	1630	39	87	219	0

## Scenario 6

Name- sites trans	Jarry 150	CAS Drummondville 270	Québec 1620	St- Jérôme 1630
Bout-de-L'Ile	140	24	101	160
Jarry	150	0	90	163
CAS St- Hyacinthe	250	60	38	124
CAS Sorel	260	74	50	136
CAS Drummondville	270	90	0	98
CAS St-Bruno	330	34	62	148
CAS Victoriaville	340	123	45	79
CAS Valleyfield	350	48	120	202
CAS Granby	370	63	64	150
CAS St-Jean	380	40	75	162
CAS Chateauguay	390	29	87	201



CAS Vaudreuil	400	31	104	184	56
CAS					
Sherbrooke	410	101	50	141	129
CAS La Tuque	430	198	168	172	219
CAS Trois-					
Rivières	460	84	56	81	105
Beauport	480	169	104	11	193
Thetford-Mines	500	173	95	78	205
Lévis	510	172	98	22	195
Îles de la					
Madeleine	550	824	750	673	847
Rimouski	570	355	281	204	379
Rivière-du-Loup	600	279	205	128	303
Gaspé	610	644	570	493	668
Carleton	630	547	473	396	570
Baie-Comeau	640	470	403	311	493
Sept-Îles	660	644	577	486	668
Poste					
Montagnais	670	0	0	0	0
Forestville	690	395	328	236	419
Blainville	720	31	110	176	24
Hull	740	139	218	284	122
Papineauville	780	91	170	236	74
Joliette	800	48	104	136	56
Rawdon	820	54	124	156	45
St-Jovite	840	84	162	229	55
Mont-Laurier	860	165	243	310	136
Laval	890	19	97	170	33
Chicoutimi	910	315	250	156	338
St-Félicien	930	326	296	211	350
Chibougamau	940	500	469	384	523
Rouyn-Noranda	950	464	543	609	436
Amos	970	436	515	581	408
Val d'Or	1010	386	464	531	357
LG-2	1060	1048	1125	1191	1017
Némiscau	1070	1026	1102	1168	995
LG-3	1080	1088	1164	1230	1057
LG-4	1090	1229	1305	1371	1198
CERV/IREQ	1120	47	67	152	75
Québec	1620	163	98	0	187
St-Jérôme	1630	39	118	187	0

**Annexe B**  
**Résultats de l'analyse par ANOVA sur les données**  
**mensuelles**

Anova: Single  
Factor

### SUMMARY

<i>Mois</i>		<i>Count</i>	<i>Sum</i>	<i>Average</i>	<i>Variance</i>
1		45	713	15,84444444	347,179798
2		45	850	18,88888889	388,6919192
3		45	773	17,17777778	320,5131313
4		45	998	22,17777778	561,240404
5		45	805	17,88888889	233,1464646
6		45	1032	22,93333333	544,4727273
7		45	1111	24,68888889	566,2191919
8		45	749	16,64444444	226,5979798
9		45	1008	22,4	441,8818182
10		45	1157	25,71111111	599,4373737
11		45	1002	22,26666667	431,1090909
12		45	848	18,84444444	325,9979798

95%

99%

### ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>	<i>F crit</i>
Between Groups	5394,466667	11	490,4060606	1,180163849	0,297684852	1,806785154	2,281398458
Within Groups	219405,4667	528	415,5406566				
Total	224799,9333	539					

Pas de différence significative entre les mois

## **Annexe C**

### **Modèle Lingo Scénario 1**

MODEL:

SETS:

S1 / 1 .. 48/: PO, A ;

S2 /1 .. 4/: CT, F, S, Cap;

S12(S1,S2): Q, T;

ENDSETS

Min=@SUM(S12(I,J): Q(I,J)\*T(I,J)\*0.0944) + @SUM(S2(J): F(J)\*S(J) );

@FOR (S2(J):  
 @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= Cap(J) );

@FOR (S1(I):  
 @SUM(S2(J): Q(I,J)) = A(I) );

@FOR (S2(J):  
 @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= 9999999\*S(J) );

@FOR (S2: @BIN(S));

DATA:

Cap = 101 284 265 294 ;

A= 62, 39, 21, 8,  
 12, 24, 14, 10,  
 9, 12, 46, 21,  
 11, 0, 75, 16,  
 22, 21, 13, 31,  
 14, 2, 8, 48,  
 12, 0, 14, 14,  
 52, 4, 18, 8,  
 15, 3, 24, 25,  
 0, 7, 19, 4,  
 8, 37, 11, 9, 17, 19, 54, 30;  
 F= 7317 10583 9800 6967;  
 T=24, 70, 160, 55, 0, 60, 163, 39, 60, 0,  
 124, 87, 74, 45, 136, 102, 90, 38, 98, 118,  
 34, 32, 148, 62, 123, 72, 79, 151, 48, 90,  
 202, 74, 63, 37, 150, 91, 40, 45, 162, 68,  
 29, 57, 201, 55, 31, 74, 184, 56, 101, 76,  
 141, 129, 198, 194, 172, 219, 84, 82, 81, 105,  
 169, 130, 11, 193, 173, 121, 78, 205, 172, 124,  
 22, 195, 824, 775, 673, 847, 355, 306, 204, 379,  
 279, 231, 128, 303, 644, 595, 493, 668, 547, 498,  
 396, 570, 470, 429, 311, 493, 644, 603, 486, 668,  
 0, 0, 0, 0, 395, 354, 236, 419, 31, 80,  
 176, 24, 139, 188, 284, 122, 91, 139, 236, 74,

48, 95, 136, 56, 54, 103, 156, 45, 84, 132,  
 229, 55, 165, 213, 310, 136, 19, 67, 170, 33,  
 315, 275, 156, 338, 326, 322, 211, 350, 500, 495,  
 384, 523, 464, 513, 609, 436, 436, 485, 581, 408,  
 386, 434, 531, 357, 1048, 1094, 1191, 1017, 1026, 1072,  
 1168, 995, 1088, 1134, 1230, 1057, 1229, 1257, 1371, 1198,  
 47, 37, 152, 75, 163, 124, 0, 187, 39, 87,  
 187, 0;  
 ENDDATA  
 END

MIN 7317 S( 1) + 10583 S( 2) + 9800 S( 3) + 6967 S( 4)  
 + 2.2656 Q( 1, 1) + 6.608 Q( 1, 2) + 15.104 Q( 1, 3)  
 + 5.192 Q( 1, 4) + 5.664 Q( 2, 2) + 15.3872 Q( 2, 3)  
 + 3.6816 Q( 2, 4) + 5.664 Q( 3, 1) + 11.7056 Q( 3, 3)  
 + 8.2128 Q( 3, 4) + 6.9856 Q( 4, 1) + 4.248 Q( 4, 2)  
 + 12.8384 Q( 4, 3) + 9.6288 Q( 4, 4) + 8.496 Q( 5, 1)  
 + 3.5872 Q( 5, 2) + 9.2512 Q( 5, 3) + 11.1392 Q( 5, 4)  
 + 3.2096 Q( 6, 1) + 3.0208 Q( 6, 2) + 13.9712 Q( 6, 3)  
 + 5.8528 Q( 6, 4) + 11.6112 Q( 7, 1) + 6.7968 Q( 7, 2)  
 + 7.4576 Q( 7, 3) + 14.2544 Q( 7, 4) + 4.5312 Q( 8, 1)  
 + 8.496 Q( 8, 2) + 19.0688 Q( 8, 3) + 6.9856 Q( 8, 4)  
 + 5.9472 Q( 9, 1) + 3.4928 Q( 9, 2) + 14.16 Q( 9, 3)  
 + 8.5904 Q( 9, 4) + 3.776 Q( 10, 1) + 4.248 Q( 10, 2)  
 + 15.2928 Q( 10, 3) + 6.4192 Q( 10, 4) + 2.7376 Q( 11, 1)  
 + 5.3808 Q( 11, 2) + 18.9744 Q( 11, 3) + 5.192 Q( 11, 4)  
 + 2.9264 Q( 12, 1) + 6.9856 Q( 12, 2) + 17.3696 Q( 12, 3)  
 + 5.2864 Q( 12, 4) + 9.5344 Q( 13, 1) + 7.1744 Q( 13, 2)  
 + 13.3104 Q( 13, 3) + 12.1776 Q( 13, 4) + 18.6912 Q( 14, 1)  
 + 18.3136 Q( 14, 2) + 16.2368 Q( 14, 3) + 20.6736 Q( 14, 4)  
 + 7.9296 Q( 15, 1) + 7.7408 Q( 15, 2) + 7.6464 Q( 15, 3)  
 + 9.912 Q( 15, 4) + 15.9536 Q( 16, 1) + 12.272 Q( 16, 2)  
 + 1.0384 Q( 16, 3) + 18.2192 Q( 16, 4) + 16.3312 Q( 17, 1)  
 + 11.4224 Q( 17, 2) + 7.3632 Q( 17, 3) + 19.352 Q( 17, 4)  
 + 16.2368 Q( 18, 1) + 11.7056 Q( 18, 2) + 2.0768 Q( 18, 3)  
 + 18.408 Q( 18, 4) + 77.7856 Q( 19, 1) + 73.16 Q( 19, 2)  
 + 63.5312 Q( 19, 3) + 79.9568 Q( 19, 4) + 33.512 Q( 20, 1)  
 + 28.8864 Q( 20, 2) + 19.2576 Q( 20, 3) + 35.7776 Q( 20, 4)  
 + 26.3376 Q( 21, 1) + 21.8064 Q( 21, 2) + 12.0832 Q( 21, 3)  
 + 28.6032 Q( 21, 4) + 60.7936 Q( 22, 1) + 56.168 Q( 22, 2)  
 + 46.5392 Q( 22, 3) + 63.0592 Q( 22, 4) + 51.6368 Q( 23, 1)  
 + 47.0112 Q( 23, 2) + 37.3824 Q( 23, 3) + 53.808 Q( 23, 4)  
 + 44.368 Q( 24, 1) + 40.4976 Q( 24, 2) + 29.3584 Q( 24, 3)  
 + 46.5392 Q( 24, 4) + 60.7936 Q( 25, 1) + 56.9232 Q( 25, 2)  
 + 45.8784 Q( 25, 3) + 63.0592 Q( 25, 4) + 37.288 Q( 27, 1)  
 + 33.4176 Q( 27, 2) + 22.2784 Q( 27, 3) + 39.5536 Q( 27, 4)  
 + 2.9264 Q( 28, 1) + 7.552 Q( 28, 2) + 16.6144 Q( 28, 3)  
 + 2.2656 Q( 28, 4) + 13.1216 Q( 29, 1) + 17.7472 Q( 29, 2)  
 + 26.8096 Q( 29, 3) + 11.5168 Q( 29, 4) + 8.5904 Q( 30, 1)  
 + 13.1216 Q( 30, 2) + 22.2784 Q( 30, 3) + 6.9856 Q( 30, 4)  
 + 4.5312 Q( 31, 1) + 8.968 Q( 31, 2) + 12.8384 Q( 31, 3)  
 + 5.2864 Q( 31, 4) + 5.0976 Q( 32, 1) + 9.7232 Q( 32, 2)  
 + 14.7264 Q( 32, 3) + 4.248 Q( 32, 4) + 7.9296 Q( 33, 1)  
 + 12.4608 Q( 33, 2) + 21.6176 Q( 33, 3) + 5.192 Q( 33, 4)

+ 15.576 Q( 34, 1) + 20.1072 Q( 34, 2) + 29.264 Q( 34, 3)  
 + 12.8384 Q( 34, 4) + 1.7936 Q( 35, 1) + 6.3248 Q( 35, 2)  
 + 16.048 Q( 35, 3) + 3.1152 Q( 35, 4) + 29.736 Q( 36, 1)  
 + 25.96 Q( 36, 2) + 14.7264 Q( 36, 3) + 31.9072 Q( 36, 4)  
 + 30.7744 Q( 37, 1) + 30.3968 Q( 37, 2) + 19.9184 Q( 37, 3)  
 + 33.04 Q( 37, 4) + 47.2 Q( 38, 1) + 46.728 Q( 38, 2)  
 + 36.2496 Q( 38, 3) + 49.3712 Q( 38, 4) + 43.8016 Q( 39, 1)  
 + 48.4272 Q( 39, 2) + 57.4896 Q( 39, 3) + 41.1584 Q( 39, 4)  
 + 41.1584 Q( 40, 1) + 45.784 Q( 40, 2) + 54.8464 Q( 40, 3)  
 + 38.5152 Q( 40, 4) + 36.4384 Q( 41, 1) + 40.9696 Q( 41, 2)  
 + 50.1264 Q( 41, 3) + 33.7008 Q( 41, 4) + 98.9312 Q( 42, 1)  
 + 103.2736 Q( 42, 2) + 112.4304 Q( 42, 3) + 96.0048 Q( 42, 4)  
 + 96.8544 Q( 43, 1) + 101.1968 Q( 43, 2) + 110.2592 Q( 43, 3)  
 + 93.928 Q( 43, 4) + 102.7072 Q( 44, 1) + 107.0496 Q( 44, 2)  
 + 116.112 Q( 44, 3) + 99.7808 Q( 44, 4) + 116.0176 Q( 45, 1)  
 + 118.6608 Q( 45, 2) + 129.4224 Q( 45, 3) + 113.0912 Q( 45, 4)  
 + 4.4368 Q( 46, 1) + 3.4928 Q( 46, 2) + 14.3488 Q( 46, 3)  
 + 7.08 Q( 46, 4) + 15.3872 Q( 47, 1) + 11.7056 Q( 47, 2)  
 + 17.6528 Q( 47, 4) + 3.6816 Q( 48, 1) + 8.2128 Q( 48, 2)  
 + 17.6528 Q( 48, 3)

SUBJECT TO

- 2]  $Q(1, 1) + Q(2, 1) + Q(3, 1) + Q(4, 1) + Q(5, 1) + Q(6, 1)$   
 $+ Q(7, 1) + Q(8, 1) + Q(9, 1) + Q(10, 1) + Q(11, 1)$   
 $+ Q(12, 1) + Q(13, 1) + Q(14, 1) + Q(15, 1) + Q(16, 1)$   
 $+ Q(17, 1) + Q(18, 1) + Q(19, 1) + Q(20, 1) + Q(21, 1)$   
 $+ Q(22, 1) + Q(23, 1) + Q(24, 1) + Q(25, 1) + Q(26, 1)$   
 $+ Q(27, 1) + Q(28, 1) + Q(29, 1) + Q(30, 1) + Q(31, 1)$   
 $+ Q(32, 1) + Q(33, 1) + Q(34, 1) + Q(35, 1) + Q(36, 1)$   
 $+ Q(37, 1) + Q(38, 1) + Q(39, 1) + Q(40, 1) + Q(41, 1)$   
 $+ Q(42, 1) + Q(43, 1) + Q(44, 1) + Q(45, 1) + Q(46, 1)$   
 $+ Q(47, 1) + Q(48, 1) \leq 101$
- 3]  $Q(1, 2) + Q(2, 2) + Q(3, 2) + Q(4, 2) + Q(5, 2) + Q(6, 2)$   
 $+ Q(7, 2) + Q(8, 2) + Q(9, 2) + Q(10, 2) + Q(11, 2)$   
 $+ Q(12, 2) + Q(13, 2) + Q(14, 2) + Q(15, 2) + Q(16, 2)$   
 $+ Q(17, 2) + Q(18, 2) + Q(19, 2) + Q(20, 2) + Q(21, 2)$   
 $+ Q(22, 2) + Q(23, 2) + Q(24, 2) + Q(25, 2) + Q(26, 2)$   
 $+ Q(27, 2) + Q(28, 2) + Q(29, 2) + Q(30, 2) + Q(31, 2)$   
 $+ Q(32, 2) + Q(33, 2) + Q(34, 2) + Q(35, 2) + Q(36, 2)$   
 $+ Q(37, 2) + Q(38, 2) + Q(39, 2) + Q(40, 2) + Q(41, 2)$   
 $+ Q(42, 2) + Q(43, 2) + Q(44, 2) + Q(45, 2) + Q(46, 2)$   
 $+ Q(47, 2) + Q(48, 2) \leq 284$
- 4]  $Q(1, 3) + Q(2, 3) + Q(3, 3) + Q(4, 3) + Q(5, 3) + Q(6, 3)$   
 $+ Q(7, 3) + Q(8, 3) + Q(9, 3) + Q(10, 3) + Q(11, 3)$   
 $+ Q(12, 3) + Q(13, 3) + Q(14, 3) + Q(15, 3) + Q(16, 3)$   
 $+ Q(17, 3) + Q(18, 3) + Q(19, 3) + Q(20, 3) + Q(21, 3)$   
 $+ Q(22, 3) + Q(23, 3) + Q(24, 3) + Q(25, 3) + Q(26, 3)$   
 $+ Q(27, 3) + Q(28, 3) + Q(29, 3) + Q(30, 3) + Q(31, 3)$   
 $+ Q(32, 3) + Q(33, 3) + Q(34, 3) + Q(35, 3) + Q(36, 3)$   
 $+ Q(37, 3) + Q(38, 3) + Q(39, 3) + Q(40, 3) + Q(41, 3)$   
 $+ Q(42, 3) + Q(43, 3) + Q(44, 3) + Q(45, 3) + Q(46, 3)$   
 $+ Q(47, 3) + Q(48, 3) \leq 265$
- 5]  $Q(1, 4) + Q(2, 4) + Q(3, 4) + Q(4, 4) + Q(5, 4) + Q(6, 4)$   
 $+ Q(7, 4) + Q(8, 4) + Q(9, 4) + Q(10, 4) + Q(11, 4)$   
 $+ Q(12, 4) + Q(13, 4) + Q(14, 4) + Q(15, 4) + Q(16, 4)$

$$\begin{aligned}
& + Q(17, 4) + Q(18, 4) + Q(19, 4) + Q(20, 4) + Q(21, 4) \\
& + Q(22, 4) + Q(23, 4) + Q(24, 4) + Q(25, 4) + Q(26, 4) \\
& + Q(27, 4) + Q(28, 4) + Q(29, 4) + Q(30, 4) + Q(31, 4) \\
& + Q(32, 4) + Q(33, 4) + Q(34, 4) + Q(35, 4) + Q(36, 4) \\
& + Q(37, 4) + Q(38, 4) + Q(39, 4) + Q(40, 4) + Q(41, 4) \\
& + Q(42, 4) + Q(43, 4) + Q(44, 4) + Q(45, 4) + Q(46, 4) \\
& + Q(47, 4) + Q(48, 4) \leq 294 \\
6] & Q(1, 1) + Q(1, 2) + Q(1, 3) + Q(1, 4) = 62 \\
7] & Q(2, 1) + Q(2, 2) + Q(2, 3) + Q(2, 4) = 39 \\
8] & Q(3, 1) + Q(3, 2) + Q(3, 3) + Q(3, 4) = 21 \\
9] & Q(4, 1) + Q(4, 2) + Q(4, 3) + Q(4, 4) = 8 \\
10] & Q(5, 1) + Q(5, 2) + Q(5, 3) + Q(5, 4) = 12 \\
11] & Q(6, 1) + Q(6, 2) + Q(6, 3) + Q(6, 4) = 24 \\
12] & Q(7, 1) + Q(7, 2) + Q(7, 3) + Q(7, 4) = 14 \\
13] & Q(8, 1) + Q(8, 2) + Q(8, 3) + Q(8, 4) = 10 \\
14] & Q(9, 1) + Q(9, 2) + Q(9, 3) + Q(9, 4) = 9 \\
15] & Q(10, 1) + Q(10, 2) + Q(10, 3) + Q(10, 4) = 12 \\
16] & Q(11, 1) + Q(11, 2) + Q(11, 3) + Q(11, 4) = 46 \\
17] & Q(12, 1) + Q(12, 2) + Q(12, 3) + Q(12, 4) = 21 \\
18] & Q(13, 1) + Q(13, 2) + Q(13, 3) + Q(13, 4) = 11 \\
19] & Q(14, 1) + Q(14, 2) + Q(14, 3) + Q(14, 4) = 0 \\
20] & Q(15, 1) + Q(15, 2) + Q(15, 3) + Q(15, 4) = 75 \\
21] & Q(16, 1) + Q(16, 2) + Q(16, 3) + Q(16, 4) = 16 \\
22] & Q(17, 1) + Q(17, 2) + Q(17, 3) + Q(17, 4) = 22 \\
23] & Q(18, 1) + Q(18, 2) + Q(18, 3) + Q(18, 4) = 21 \\
24] & Q(19, 1) + Q(19, 2) + Q(19, 3) + Q(19, 4) = 13 \\
25] & Q(20, 1) + Q(20, 2) + Q(20, 3) + Q(20, 4) = 31 \\
26] & Q(21, 1) + Q(21, 2) + Q(21, 3) + Q(21, 4) = 14 \\
27] & Q(22, 1) + Q(22, 2) + Q(22, 3) + Q(22, 4) = 2 \\
28] & Q(23, 1) + Q(23, 2) + Q(23, 3) + Q(23, 4) = 8 \\
29] & Q(24, 1) + Q(24, 2) + Q(24, 3) + Q(24, 4) = 48 \\
30] & Q(25, 1) + Q(25, 2) + Q(25, 3) + Q(25, 4) = 12 \\
31] & Q(26, 1) + Q(26, 2) + Q(26, 3) + Q(26, 4) = 0 \\
32] & Q(27, 1) + Q(27, 2) + Q(27, 3) + Q(27, 4) = 14 \\
33] & Q(28, 1) + Q(28, 2) + Q(28, 3) + Q(28, 4) = 14 \\
34] & Q(29, 1) + Q(29, 2) + Q(29, 3) + Q(29, 4) = 52 \\
35] & Q(30, 1) + Q(30, 2) + Q(30, 3) + Q(30, 4) = 4 \\
36] & Q(31, 1) + Q(31, 2) + Q(31, 3) + Q(31, 4) = 18 \\
37] & Q(32, 1) + Q(32, 2) + Q(32, 3) + Q(32, 4) = 8 \\
38] & Q(33, 1) + Q(33, 2) + Q(33, 3) + Q(33, 4) = 15 \\
39] & Q(34, 1) + Q(34, 2) + Q(34, 3) + Q(34, 4) = 3 \\
40] & Q(35, 1) + Q(35, 2) + Q(35, 3) + Q(35, 4) = 24 \\
41] & Q(36, 1) + Q(36, 2) + Q(36, 3) + Q(36, 4) = 25 \\
42] & Q(37, 1) + Q(37, 2) + Q(37, 3) + Q(37, 4) = 0 \\
43] & Q(38, 1) + Q(38, 2) + Q(38, 3) + Q(38, 4) = 7 \\
44] & Q(39, 1) + Q(39, 2) + Q(39, 3) + Q(39, 4) = 19 \\
45] & Q(40, 1) + Q(40, 2) + Q(40, 3) + Q(40, 4) = 4 \\
46] & Q(41, 1) + Q(41, 2) + Q(41, 3) + Q(41, 4) = 8 \\
47] & Q(42, 1) + Q(42, 2) + Q(42, 3) + Q(42, 4) = 37 \\
48] & Q(43, 1) + Q(43, 2) + Q(43, 3) + Q(43, 4) = 11 \\
49] & Q(44, 1) + Q(44, 2) + Q(44, 3) + Q(44, 4) = 9 \\
50] & Q(45, 1) + Q(45, 2) + Q(45, 3) + Q(45, 4) = 17 \\
51] & Q(46, 1) + Q(46, 2) + Q(46, 3) + Q(46, 4) = 19 \\
52] & Q(47, 1) + Q(47, 2) + Q(47, 3) + Q(47, 4) = 54
\end{aligned}$$



```

53] Q( 48, 1) + Q( 48, 2) + Q( 48, 3) + Q( 48, 4) = 30
54]- ***** S( 1) + Q( 1, 1) + Q( 2, 1) + Q( 3, 1) + Q( 4, 1)
    + Q( 5, 1) + Q( 6, 1) + Q( 7, 1) + Q( 8, 1) + Q( 9, 1)
    + Q( 10, 1) + Q( 11, 1) + Q( 12, 1) + Q( 13, 1) + Q( 14, 1)
    + Q( 15, 1) + Q( 16, 1) + Q( 17, 1) + Q( 18, 1) + Q( 19, 1)
    + Q( 20, 1) + Q( 21, 1) + Q( 22, 1) + Q( 23, 1) + Q( 24, 1)
    + Q( 25, 1) + Q( 26, 1) + Q( 27, 1) + Q( 28, 1) + Q( 29, 1)
    + Q( 30, 1) + Q( 31, 1) + Q( 32, 1) + Q( 33, 1) + Q( 34, 1)
    + Q( 35, 1) + Q( 36, 1) + Q( 37, 1) + Q( 38, 1) + Q( 39, 1)
    + Q( 40, 1) + Q( 41, 1) + Q( 42, 1) + Q( 43, 1) + Q( 44, 1)
    + Q( 45, 1) + Q( 46, 1) + Q( 47, 1) + Q( 48, 1) <= 0
55]- ***** S( 2) + Q( 1, 2) + Q( 2, 2) + Q( 3, 2) + Q( 4, 2)
    + Q( 5, 2) + Q( 6, 2) + Q( 7, 2) + Q( 8, 2) + Q( 9, 2)
    + Q( 10, 2) + Q( 11, 2) + Q( 12, 2) + Q( 13, 2) + Q( 14, 2)
    + Q( 15, 2) + Q( 16, 2) + Q( 17, 2) + Q( 18, 2) + Q( 19, 2)
    + Q( 20, 2) + Q( 21, 2) + Q( 22, 2) + Q( 23, 2) + Q( 24, 2)
    + Q( 25, 2) + Q( 26, 2) + Q( 27, 2) + Q( 28, 2) + Q( 29, 2)
    + Q( 30, 2) + Q( 31, 2) + Q( 32, 2) + Q( 33, 2) + Q( 34, 2)
    + Q( 35, 2) + Q( 36, 2) + Q( 37, 2) + Q( 38, 2) + Q( 39, 2)
    + Q( 40, 2) + Q( 41, 2) + Q( 42, 2) + Q( 43, 2) + Q( 44, 2)
    + Q( 45, 2) + Q( 46, 2) + Q( 47, 2) + Q( 48, 2) <= 0
56]- ***** S( 3) + Q( 1, 3) + Q( 2, 3) + Q( 3, 3) + Q( 4, 3)
    + Q( 5, 3) + Q( 6, 3) + Q( 7, 3) + Q( 8, 3) + Q( 9, 3)
    + Q( 10, 3) + Q( 11, 3) + Q( 12, 3) + Q( 13, 3) + Q( 14, 3)
    + Q( 15, 3) + Q( 16, 3) + Q( 17, 3) + Q( 18, 3) + Q( 19, 3)
    + Q( 20, 3) + Q( 21, 3) + Q( 22, 3) + Q( 23, 3) + Q( 24, 3)
    + Q( 25, 3) + Q( 26, 3) + Q( 27, 3) + Q( 28, 3) + Q( 29, 3)
    + Q( 30, 3) + Q( 31, 3) + Q( 32, 3) + Q( 33, 3) + Q( 34, 3)
    + Q( 35, 3) + Q( 36, 3) + Q( 37, 3) + Q( 38, 3) + Q( 39, 3)
    + Q( 40, 3) + Q( 41, 3) + Q( 42, 3) + Q( 43, 3) + Q( 44, 3)
    + Q( 45, 3) + Q( 46, 3) + Q( 47, 3) + Q( 48, 3) <= 0
57]- ***** S( 4) + Q( 1, 4) + Q( 2, 4) + Q( 3, 4) + Q( 4, 4)
    + Q( 5, 4) + Q( 6, 4) + Q( 7, 4) + Q( 8, 4) + Q( 9, 4)
    + Q( 10, 4) + Q( 11, 4) + Q( 12, 4) + Q( 13, 4) + Q( 14, 4)
    + Q( 15, 4) + Q( 16, 4) + Q( 17, 4) + Q( 18, 4) + Q( 19, 4)
    + Q( 20, 4) + Q( 21, 4) + Q( 22, 4) + Q( 23, 4) + Q( 24, 4)
    + Q( 25, 4) + Q( 26, 4) + Q( 27, 4) + Q( 28, 4) + Q( 29, 4)
    + Q( 30, 4) + Q( 31, 4) + Q( 32, 4) + Q( 33, 4) + Q( 34, 4)
    + Q( 35, 4) + Q( 36, 4) + Q( 37, 4) + Q( 38, 4) + Q( 39, 4)
    + Q( 40, 4) + Q( 41, 4) + Q( 42, 4) + Q( 43, 4) + Q( 44, 4)
    + Q( 45, 4) + Q( 46, 4) + Q( 47, 4) + Q( 48, 4) <= 0
END
INTE S( 1)
INTE S( 2)
INTE S( 3)
INTE S( 4)

```

## **Annexe D**

### **Modèle Lingo Scénario 2**

```

SETS:
S1 / 1 .. 48/: PO, A ;
S2 /1 .. 3/: CT, F, S, Cap;
S12(S1,S2): Q, T;
ENDSETS
Min=@SUM(S12(I,J): Q(I,J)*T(I,J)*0.0944) + @SUM(S2(J): F(J)*S(J) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= Cap(J) );
@FOR (S1(I):
    @SUM(S2(J): Q(I,J)) = A(I) );
@FOR (S2(J):      @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= 9999999*S(J) );
@FOR (S2: @BIN(S));
DATA:
Cap = 324 287 333 ;
A= 62, 39, 21, 8,
    12, 24, 14, 10, 9, 12, 46, 21,
    11, 0, 75, 16,
    22, 21, 13, 31,
    14, 2, 8, 48,
    12, 0, 14, 14,
    52, 4, 18, 8,
    15, 3, 24, 25, 0, 7, 19, 4, 8, 37, 11, 9, 17, 19, 54, 30;
F= 10583 9800 6967;
T=70, 160, 55, 60, 163, 39, 0, 124, 87, 45, 136, 102, 38, 98, 118, 32, 148, 62, 72, 79, 151, 90,
202, 74, 37, 150, 91, 45, 162, 68, 57, 201, 55, 74, 184, 56, 76,
141, 129, 194, 172, 219, 82, 81, 105, 130, 11, 193, 121, 78, 205, 124,
22, 195, 775, 673, 847, 306, 204, 379, 231, 128, 303, 595, 493, 668, 498,
396, 570, 429, 311, 493, 603, 486, 668, 0, 0, 0, 354, 236, 419, 80,
176, 24, 188, 284, 122, 139, 236, 74, 95, 136, 56, 103, 156, 45, 132,
229, 55, 213, 310, 136, 67, 170, 33, 275, 156, 338, 322, 211, 350, 495,
384, 523, 513, 609, 436, 485, 581, 408, 434, 531, 357, 1094, 1191, 1017, 1072,
1168, 995, 1134, 1230, 1057, 1257, 1371, 1198, 37, 152, 75, 124, 0, 187, 87,
187, 0;
ENDDATA
END

```

## **Annexe E**

### **Modèle Lingo scénario 3**

```

MODEL:
SETS:
S1 / 1 .. 48/: PO, A ;
S2 /1 .. 4/: CT, F, S, Cap;
S12(S1,S2): Q, T;
ENDSETS
Min=@SUM(S12(I,J): Q(I,J)*T(I,J)*0.0944) + @SUM(S2(J): F(J)*S(J) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= Cap(J) );
@FOR (S1(I):
    @SUM(S2(J): Q(I,J)) = A(I) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= 9999999*S(J) );
@FOR (S2: @BIN(S));
DATA:
Cap = 196 275 265 209 ;
A= 62, 39, 21, 8,
    12, 24, 14, 10,
    9, 12, 46, 21,
    11, 0, 75, 16,
    22, 21, 13, 31,
    14, 2, 8, 48, 12, 0, 14, 14,
    52, 4, 18, 8, 15, 3, 24, 25,
    0, 7, 19, 4, 8, 37, 11, 9, 17, 19, 54, 30;
F= 7317 10583 9800 6967;
T=24, 70, 160, 55, 0, 60, 163, 39, 60, 0,
    124, 87, 74, 45, 136, 102, 90, 38, 98, 118,
    34, 32, 148, 62, 123, 72, 79, 151, 48, 90,
    202, 74, 63, 37, 150, 91, 40, 45, 162, 68,
    29, 57, 201, 55, 31, 74, 184, 56, 101, 76,
    141, 129, 198, 194, 172, 219, 84, 82, 81, 105,
    169, 130, 11, 193, 173, 121, 78, 205, 172, 124,
    22, 195, 824, 775, 673, 847, 355, 306, 204, 379,
    279, 231, 128, 303, 644, 595, 493, 668, 547, 498,
    396, 570, 470, 429, 311, 493, 644, 603, 486, 668,
    0, 0, 0, 0, 395, 354, 236, 419, 31, 80,
    176, 24, 139, 188, 284, 122, 91, 139, 236, 74,
    48, 95, 136, 56, 54, 103, 156, 45, 84, 132,
    229, 55, 165, 213, 310, 136, 19, 67, 170, 33,
    315, 275, 156, 338, 326, 322, 211, 350, 500, 495,
    384, 523, 464, 513, 609, 436, 436, 485, 581, 408,
    386, 434, 531, 357, 1048, 1094, 1191, 1017, 1026, 1072,
    1168, 995, 1088, 1134, 1230, 1057, 1229, 1257, 1371, 1198,
    47, 37, 152, 75, 163, 124, 0, 187, 39, 87,
    187, 0;
ENDDATA
END

```

## **Annexe F**

### **Modèle Lingo Scénario 4**

```

MODEL:
SETS:
S1 / 1 .. 48/: PO, A ;
S2 /1 .. 4/: CT, F, S, Cap;
S12(S1,S2): Q, T;
ENDSETS
Min=@SUM(S12(I,J): Q(I,J)*T(I,J)*0.0944) + @SUM(S2(J): F(J)*S(J) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= Cap(J) );
@FOR (S1(I):
    @SUM(S2(J): Q(I,J)) = A(I) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= 9999999*S(J) );
@FOR (S2: @BIN(S));
DATA:
Cap = 101 284 265 294 ;
A= 62, 39, 21, 8,
12, 24, 14, 10,
9, 12, 46, 21,
11, 0, 75, 16,
22, 21, 13, 31, 14, 2, 8, 48,
12, 0, 14, 14, 52, 4, 18, 8,
15, 3, 24, 25, 0, 7, 19, 4, 8, 37, 11, 9, 17, 19, 54, 30;
F= 7317 10583 9800 6967;
T=24, 70, 160, 45, 0, 60, 163, 48, 60, 0, 124, 95,
74, 45, 136, 110, 90, 38, 98, 104, 34, 32, 148, 71, 123, 72, 79, 103,
48, 90, 202, 86,
63, 37, 150, 99,
40, 45, 162, 78,
29, 57, 201, 67,
31, 74, 184, 68,
101, 76, 141, 137,
198, 194, 172, 171,
84, 82, 81, 56,
169, 130, 11, 142,
173, 121, 78, 154,
172, 124, 22, 144,
824, 775, 673, 796,
355, 306, 204, 327,
279, 231, 128, 252,
644, 595, 493, 668,
547, 498, 396, 519,
470, 429, 311, 442,
644, 603, 486, 617,
0, 0, 0, 0,
395, 354, 236, 367,
31, 80, 176, 61,
139, 188, 284, 161,
91, 139, 236, 113,
48, 95, 136, 0,
54, 103, 156, 26,
84, 132, 229, 100,

```

165, 213, 310, 181,  
19, 67, 170, 54,  
315, 275, 156, 287,  
326, 322, 211, 299,  
500, 495, 384, 472,  
464, 513, 609, 481,  
436, 485, 581, 453,  
386, 434, 531, 402,  
1048, 1094, 1191, 1060,  
1026, 1072, 1168, 1038,  
1088, 1134, 1230, 1100,  
1229, 1257, 1371, 1241,  
47, 37, 152, 83,  
163, 124, 0, 136,  
39, 87,  
187, 56;  
ENDDATA  
END



```

SETS:
S1 / 1 .. 48/: PO, A ;
S2 / 1 .. 3/: CT, F, S, Cap;
S12(S1,S2): Q, T;
ENDSETS
Min=@SUM(S12(I,J): Q(I,J)*T(I,J)*0.0944) + @SUM(S2(J): F(J)*S(J) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= Cap(J) );
@FOR (S1(I):
    @SUM(S2(J): Q(I,J)) = A(I) );
@FOR (S2(J): @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= 9999999*S(J) );
@FOR (S2: @BIN(S));
DATA:
Cap = 324 287 333 ;
A= 62, 39, 21, 8,
    12, 24, 14, 10, 9, 12, 46, 21,
    11, 0, 75, 16,
    22, 21, 13, 31,
    14, 2, 8, 48,
    12, 0, 14, 14,
    52, 4, 18, 8,
    15, 3, 24, 25, 0, 7, 19, 4, 8, 37, 11, 9, 17, 19, 54, 30;
F= 10583 9800 6967;
T=70, 160, 55, 60, 163, 39, 0, 124, 87, 45, 136, 102, 38, 98, 118, 32, 148, 62, 72, 79, 151, 90,
202, 74, 37, 150, 91, 45, 162, 68, 57, 201, 55, 74, 184, 56, 76,
141, 129, 194, 172, 219, 82, 81, 105, 130, 11, 193, 121, 78, 205, 124,
22, 195, 775, 673, 847, 306, 204, 379, 231, 128, 303, 595, 493, 668, 498,
396, 570, 429, 311, 493, 603, 486, 668, 0, 0, 0, 354, 236, 419, 80,
176, 24, 188, 284, 122, 139, 236, 74, 95, 136, 56, 103, 156, 45, 132,
229, 55, 213, 310, 136, 67, 170, 33, 275, 156, 338, 322, 211, 350, 495,
384, 523, 513, 609, 436, 485, 581, 408, 434, 531, 357, 1094, 1191, 1017, 1072,
1168, 995, 1134, 1230, 1057, 1257, 1371, 1198, 37, 152, 75, 124, 0, 187, 87,
187, 0;
ENDDATA
END

```

```

MODEL:
SETS:
S1 / 1 .. 48/: PO, A ;
S2 / 1 .. 4/: CT, F, S, Cap;
S12(S1,S2): Q, T;
ENDSETS
Min=@SUM(S12(I,J): Q(I,J)*T(I,J)*0.0944) + @SUM(S2(J): F(J)*S(J) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= Cap(J) );
@FOR (S1(I):
    @SUM(S2(J): Q(I,J)) = A(I) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= 9999999*S(J) );
@FOR (S2: @BIN(S));
DATA:
Cap = 101 284 265 294 ;
A= 62, 39, 21, 8,
12, 24, 14, 10,
9, 12, 46, 21,
11, 0, 75, 16,
22, 21, 13, 31,
14, 2, 8, 48,
12, 0, 14, 14,
52, 4, 18, 8,
15, 3, 24, 25,
0, 7, 19, 4,
8, 37, 11, 9, 17, 19, 54, 30;
F= 7317 10583 9800 6967;
T=24, 70, 195, 55, 0, 60, 198, 39, 60, 0,
194, 87, 74, 45, 177, 102, 90, 38, 168, 118,
34, 32, 218, 62, 123, 72, 166, 151, 48, 90,
237, 74, 63, 37, 220, 91, 40, 45, 228, 68,
29, 57, 218, 55, 31, 74, 219, 56, 101, 76,
211, 129, 198, 194, 0, 219, 84, 82, 121, 105, 169, 130, 178, 193, 173, 121, 217, 205, 172, 124,
180, 195, 824, 775, 832, 847, 355, 306, 364, 379,
279, 231, 228, 303, 644, 595, 653, 668, 547, 498, 555, 570, 470, 429, 402, 493, 644, 603, 576, 668,
0, 0, 0, 0, 395, 354, 327, 419, 31, 80,
211, 24, 139, 188, 319, 122, 91, 139, 271, 74,
48, 95, 171, 56, 54, 103, 182, 45, 84, 132,
261, 55, 165, 213, 342, 136, 19, 67, 205, 33,
315, 275, 170, 338, 326, 322, 137, 350, 500, 495,
311, 523, 464, 513, 642, 436, 436, 485, 586, 408,
386, 434, 563, 357, 1048, 1094, 1149, 1017, 1026, 1072,
1128, 995, 1088, 1134, 1189, 1057, 1229, 1275, 1330, 1198,
47, 37, 214, 75, 163, 124, 172, 187, 39, 87,
219, 0;

ENDDATA
END

```

## **Annexe G**

### **Modèle Lingo Scénario 6**

```

MODEL:
SETS:
S1 / 1 .. 48/: PO, A ;
S2 /1 .. 4/: CT, F, S, Cap;
S12(S1,S2): Q, T;
ENDSETS
Min=@SUM(S12(I,J): Q(I,J)*T(I,J)*0.0944) + @SUM(S2(J): F(J)*S(J) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= Cap(J) );
@FOR (S1(I):
    @SUM(S2(J): Q(I,J)) = A(I) );
@FOR (S2(J):
    @SUM(S1(I): Q(I,J)) <= 9999999*S(J) );
@FOR (S2: @BIN(S));
DATA:
Cap = 101 284 265 294 ;
A= 62, 39, 21, 8,
    12, 24, 14, 10,
    9, 12, 46, 21,
    11, 0, 75, 16,
    22, 21, 13, 31,
    14, 2, 8, 48,
    12, 0, 14, 14,
    52, 4, 18, 8,
    15, 3, 24, 25,
    0, 7, 19, 4,
    8, 37, 11, 9, 17, 19, 54, 30;
F= 7317 10583 9800 6967;
T=24, 101, 160, 55, 0, 90, 163, 39,
    60, 38, 124, 87,
    74, 45, 136, 102,
    90, 0, 98, 118,
    34, 62, 148, 62,
    123, 45, 79, 151,
    48, 120, 202, 74,
    63, 64, 150, 91,
    40, 75, 162, 68,
    29, 87, 201, 55,
    31, 104, 184, 56,
    101, 50, 141, 129,
    198, 168, 172, 219,
    84, 56, 81, 105,
    169, 104, 11, 193, 173, 95, 78, 205, 172, 98, 22, 195,
    824, 750, 673, 847, 355, 281, 204, 379, 279, 205, 128, 303, 644, 570, 493, 668, 547, 473, 396, 570,
    470, 403, 311, 493, 644, 577, 486, 668,
    0, 0, 0, 0, 395, 328, 236, 419, 31, 110, 176, 24, 139, 218, 284, 122, 91, 170, 236, 74, 48, 104, 136,
    56, 54, 124, 156, 45, 84, 162, 229, 55,
    165, 243, 310, 136, 19, 97, 170, 33, 315, 250, 156, 338, 326, 296, 211, 350, 500, 469, 384, 523,
    464, 543, 609, 436, 436, 515, 581, 408,
    386, 464, 531, 357, 1048, 1125, 1191, 1017, 1026, 1102, 1168, 995,
    1088, 1164, 1230, 1057, 1229, 1305, 1371, 1198, 47, 67, 152, 75,
    163, 98, 0, 187, 39, 118, 187, 0;
ENDDATA
END

```